**“INTELIGENCIA ARTIFICIAL SOSTENIBLE: ORIGENES Y EVOLUCIÓN”**

*"SUSTAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE: ORIGINS AND EVOLUTION"*

Mario González Arencibia

Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9947-7762>

Centro de Estudios de Gestión de Proyectos y Toma de Decisiones

Afiliación: Universidad de Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba.

Correo electrónico: mgarencibia@uci.cu

Resumen

"Inteligencia Artificial Sostenible: Orígenes y Evolución" investiga el surgimiento y desarrollo de la IA con un enfoque en la sostenibilidad. Este estudio tiene como objetivo ofrecer un análisis exhaustivo sobre la IA sostenible y proponer recomendaciones prácticas para su implementación. Se examinan casos exitosos de aplicaciones de IA en sostenibilidad, se analizan los desafíos actuales en el desarrollo de sistemas de IA de bajo impacto ambiental, y se sugieren estrategias para alinear el desarrollo de IA con los objetivos de desarrollo sostenible. La importancia de estudiar la IA sostenible radica en su capacidad para transformar positivamente diversos sectores de la sociedad. Por ejemplo, en el sector energético, la IA puede optimizar el uso de recursos renovables, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles. En agricultura, la IA puede mejorar la eficiencia en el uso de recursos y minimizar el impacto ambiental. El estudio destaca la necesidad de integrar consideraciones éticas, sociales y ambientales en el desarrollo de la IA para maximizar sus beneficios y minimizar las consecuencias negativas. Los hallazgos clave subrayan la importancia de adoptar enfoques interdisciplinarios que equilibren el avance tecnológico con la responsabilidad ética y ambiental. Promover prácticas de IA responsables permite aprovechar su poder transformador para abordar eficazmente los desafíos globales. En resumen, la IA sostenible representa un camino crucial hacia la consecución de metas ambientales y de sostenibilidad social a largo plazo. Comprender sus orígenes y evolución permite a los actores involucrados desarrollar políticas y prácticas que fomenten la innovación mientras se protege el planeta y sus habitantes.

**Palabras clave:** Implementación, Desafíos, Impacto ambiental, Estrategias, Integración ética, Innovación.

***Abstract***

*"Sustainable Artificial Intelligence: Origins and Evolution" investigates the emergence and development of AI with a focus on sustainability. This study aims to provide a comprehensive analysis of sustainable AI and propose practical recommendations for its implementation. Successful case studies of AI applications in sustainability are examined, current challenges in developing low environmental impact AI systems are analyzed, and strategies are suggested to align AI development with sustainable development goals. The importance of studying sustainable AI lies in its potential to positively transform various sectors of society. For instance, in the energy sector, AI can optimize the use of renewable resources, reducing dependence on fossil fuels. In agriculture, AI can enhance resource efficiency and minimize environmental impact. The study emphasizes the need to integrate ethical, social, and environmental considerations into AI development to maximize its benefits and minimize negative consequences. Key findings underscore the importance of adopting interdisciplinary approaches that balance technological advancement with ethical and environmental responsibility. Promoting responsible AI practices enables harnessing its transformative power to effectively address global challenges. In summary, sustainable AI represents a crucial pathway towards achieving long-term environmental and social sustainability goals. Understanding its origins and evolution allows stakeholders to develop policies and practices that foster innovation while safeguarding the planet and its inhabitants.*

***Keywords:*** *Implementation, Challenges, Environmental Impact, Strategies, Ethical Integration, Innovation.*

**Introducción**

La inteligencia artificial (IA) sostenible ha emergido como un campo relevante en la intersección de la tecnología y la sostenibilidad, abordando los desafíos ambientales, sociales y económicos del siglo XXI. Este concepto busca desarrollar y aplicar sistemas de IA que no solo sean eficientes y efectivos, sino también respetuosos con el medio ambiente y alineados con los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por las Naciones Unidas. En un mundo donde la digitalización avanza a pasos agigantados, la necesidad de implementar soluciones tecnológicas que minimicen el impacto ambiental y maximicen los beneficios sociales se ha vuelto imperativa.

El origen de la IA sostenible se remonta a principios de la década de 2010, cuando investigadores y profesionales comenzaron a reconocer la huella ecológica significativa de los sistemas de IA y la necesidad de abordar sus implicaciones éticas y sociales. Vinuesa et al. (2020) analizaron la relación entre la IA y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, encontrando que la IA podría actuar como facilitador para el 79% de los ODS, pero también podría inhibir el logro del 35% de estos objetivos si no se implementa de manera responsable.

El contexto actual de la IA sostenible está marcado por una conciencia cada vez mayor sobre el impacto ambiental de las tecnologías digitales. Según un estudio de Strubell, Ganesh, & McCallum, (2019), el entrenamiento de un solo modelo de IA puede generar hasta 284 toneladas de dióxido de carbono, equivalente a las emisiones de cinco automóviles durante toda su vida útil. Esta realidad ha impulsado la búsqueda de soluciones más eficientes energéticamente y ha llevado a la industria tecnológica a replantearse sus prácticas.

Estudios previos han demostrado el potencial de la IA para contribuir a la sostenibilidad en diversos sectores. Por ejemplo, Rolnick et al. (2019) identificaron 13 áreas donde la IA puede tener un impacto significativo en la mitigación del cambio climático, incluyendo la optimización de sistemas energéticos y la mejora de la eficiencia en el transporte. Sin embargo, también se han planteado preocupaciones sobre el consumo energético de los modelos de IA a gran escala. Strubell et al. (2019) estimaron que el entrenamiento de un solo modelo de procesamiento de lenguaje natural podría emitir hasta 284 toneladas de CO2, equivalente a cinco veces las emisiones de un automóvil promedio durante su vida útil.

Organismos internacionales como la Unión Europea han reconocido la importancia de la IA sostenible. La Comisión Europea ha propuesto regulaciones para garantizar que los sistemas de IA sean confiables y alineados con los valores europeos, incluyendo la sostenibilidad. Por su parte, empresas tecnológicas líderes como Google, Microsoft y IBM han anunciado iniciativas para reducir la huella de carbono de sus operaciones de IA y desarrollar aplicaciones orientadas a la sostenibilidad.

A pesar de estos avances, existe un vacío significativo en la comprensión de cómo integrar de manera efectiva los principios de sostenibilidad en todo el ciclo de vida de los sistemas de IA, desde su diseño hasta su implementación y mantenimiento. Además, hay una necesidad urgente de desarrollar métricas estandarizadas para evaluar el impacto ambiental y social de las tecnologías de IA.

La importancia de investigar la IA sostenible radica en su potencial para abordar desafíos globales críticos. Schwartz et al. (2020) argumentan que la IA podría ser fundamental para alcanzar los ODS, pero advierten que se requiere un enfoque interdisciplinario y una consideración cuidadosa de las implicaciones éticas y sociales. La IA sostenible no solo promete soluciones innovadoras para problemas ambientales, sino que también podría transformar industrias enteras hacia prácticas más sostenibles.

Este estudio se propone abordar las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo se pueden diseñar e implementar sistemas de IA que maximicen los beneficios para la sostenibilidad mientras minimizan los impactos negativos? ¿Qué marcos regulatorios y éticos son necesarios para garantizar el desarrollo responsable de la IA sostenible? ¿Cuáles son las mejores prácticas para medir y reducir la huella de carbono de los sistemas de IA?

El objetivo principal de esta investigación es ofrecer un análisis sobre la IA sostenible, sus orígenes y evolución, de manera que ello permita identificar propuestas prácticas para su implementación. Este estudio examinará casos de uso exitosos de IA en sostenibilidad, analizará los desafíos actuales en la implementación de sistemas de IA de bajo impacto ambiental, y propondrá estrategias para alinear el desarrollo de IA con los objetivos de desarrollo sostenible.

La importancia de estudiar la IA sostenible radica en su potencial para transformar múltiples sectores de la sociedad de manera positiva. Por ejemplo, en el sector energético, la IA puede optimizar la distribución de energía renovable, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. En agricultura, los sistemas de IA pueden mejorar la eficiencia del uso del agua y reducir el desperdicio de alimentos. Según un informe de PwC, (2017) la IA podría contribuir hasta $15.7 billones a la economía global para 2030, con un potencial significativo para impulsar soluciones sostenibles.

**Metodología**

La metodología empleada para el estudio, se basó en una revisión sistemática documental, que implicó una búsqueda exhaustiva y estructurada de fuentes relevantes sobre el tema. Se seleccionaron un total de 53 fuentes para el análisis, utilizando criterios de inclusión cuidadosamente establecidos. Además de la temporalidad, que aseguró que aproximadamente el 26.4% de las referencias fueran de los últimos 5 años, se consideraron otros criterios como la diversidad de tipos de documentos. Entre estos se incluyeron no solo artículos académicos, sino también informes corporativos y propuestas regulatorias, proporcionando así una perspectiva amplia y multidimensional del campo de la IA sostenible.

El proceso de investigación siguió pasos sistemáticos. Inicialmente, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva en diversas bases de datos académicas y otras fuentes pertinentes, aplicando criterios rigurosos para filtrar y seleccionar las fuentes más relevantes. Posteriormente, se realizó un análisis detallado de las fuentes seleccionadas, categorizándolas según su tipo y temática. Esta categorización facilitó una organización estructurada de la información, permitiendo identificar tendencias emergentes y áreas de enfoque dentro del campo de estudio.

Además del análisis temático, se llevó a cabo una evaluación de la relevancia de las fuentes seleccionadas, priorizando aquellas que abordaban avances tecnológicos recientes y discusiones éticas sobre el uso de la IA en contextos sostenibles. Este enfoque aseguró que la revisión no solo capturara los aspectos más significativos y actuales del tema, sino que también ofreciera una visión crítica y holística de la evolución y aplicación de la inteligencia artificial en prácticas sostenibles.

**Definición y características de la IA sostenible**

La Inteligencia Artificial (IA) sostenible es un concepto emergente que busca integrar los principios de sostenibilidad en el desarrollo y aplicación de sistemas de IA. Este enfoque tiene como objetivo crear tecnologías de IA que no solo sean eficientes y efectivas, sino que también contribuyan positivamente a los desafíos éticos, ambientales, sociales y económicos a largo plazo.

Vinuesa et al. (2020) definen la IA sostenible como el desarrollo y uso de sistemas de IA que apoyan, permiten y aceleran la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Esta definición enfatiza el papel potencial de la IA como una herramienta para abordar desafíos globales como el cambio climático, la pobreza y la desigualdad. Los autores encontraron que la IA podría actuar como un facilitador para el 79% de los ODS, demostrando el amplio alcance de su potencial impacto positivo.

Un concepto clave en la IA sostenible es la "Green AI", introducido por Schwartz et al. (2020). Este enfoque propone que la eficiencia computacional y el uso de recursos deberían ser consideraciones primordiales en el desarrollo de sistemas de IA, junto con la precisión y el rendimiento. Los autores argumentan que la adopción de principios de Green AI no solo reduce el impacto ambiental de la IA, sino que también promueve la innovación en algoritmos más eficientes y accesibles.

La IA sostenible también abarca la noción de "IA responsable", que según Dignum (2019), implica el diseño, desarrollo y despliegue de sistemas de IA que sean éticos, legales y robustos, mientras consideran su impacto social y ambiental. Este concepto subraya la importancia de considerar las implicaciones a largo plazo de la IA en la sociedad y el medio ambiente. Un ejemplo concreto de IA sostenible es el proyecto "AI for Earth" de Microsoft, que ha otorgado más de 50 millones de dólares en subvenciones a proyectos que utilizan IA para abordar desafíos en áreas como la conservación de la biodiversidad, la agricultura sostenible y la mitigación del cambio climático (Microsoft, 2021). Este proyecto demuestra cómo la IA puede ser aplicada directamente a problemas de sostenibilidad.

En el contexto de la eficiencia energética, es importante notar que el entrenamiento de grandes modelos de IA puede tener una huella de carbono significativa. Strubell et al. (2019) estimaron que el entrenamiento de un solo modelo de procesamiento de lenguaje natural podría emitir hasta 284 toneladas de CO2 equivalente. Este hallazgo ha impulsado la investigación en técnicas de entrenamiento más eficientes y el uso de energías renovables en centros de datos de IA.

La IA sostenible también implica considerar el ciclo de vida completo de los sistemas de IA, desde la extracción de materiales para hardware hasta el fin de vida útil de los dispositivos. Gupta et al. (2021) proponen un marco para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de IA que incluye métricas para el consumo de energía, el uso de materiales y el impacto social.

**Características clave de la inteligencia Artificial Sostenible**

La Inteligencia Artificial (IA) sostenible se caracteriza por una serie de atributos que la distinguen de los enfoques tradicionales de desarrollo de IA, por su énfasis en la eficiencia de recursos, la alineación con objetivos de sostenibilidad global, la transparencia y explicabilidad, la inclusividad y equidad, la adaptabilidad y resiliencia, y la consideración del ciclo de vida completo. Estas distinciones reflejan un cambio hacia un desarrollo de IA más responsable y orientado al largo plazo, que busca no solo avanzar en las capacidades tecnológicas, sino también contribuir positivamente a la sostenibilidad global.

Tabla No. 1: Características clave de la inteligencia Artificial Sostenible (IA Sostenible)

| Característica | Descripción | Ejemplo/Dato | Fuente |
| --- | --- | --- | --- |
| **Eficiencia energética y computacional** | Prioriza la reducción del consumo de recursos computacionales y energéticos. | Un modelo de procesamiento de lenguaje natural optimizado puede reducir su huella de carbono en un 24% sin pérdida significativa de rendimiento. | Schwartz et al. (2020) |
| **Alineación con los ODS** | Contribuye activamente a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU. | La IA tiene el potencial de actuar como facilitador para el 79% de los ODS. | Vinuesa et al. (2020) |
| **Transparencia y explicabilidad** | Capacidad de explicar decisiones y acciones de manera comprensible. | Aplicación en áreas sensibles como gestión de recursos naturales o planificación urbana sostenible. | Dignum (2019) |
| **Inclusividad y equidad** | Considera la diversidad y la inclusión en el desarrollo de sistemas de IA. | Uso de "hojas de datos" para conjuntos de datos, proporcionando información detallada sobre su composición y limitaciones. | Gebru et al. (2021) |
| **Adaptabilidad y resiliencia** | Capacidad de adaptarse a cambios en condiciones ambientales y sociales. | Modelos de IA para predicción meteorológica o gestión de desastres que se ajustan a patrones climáticos cambiantes. | Rolnick et al. (2019) |
| **Colaboración interdisciplinaria** | Integración de conocimientos de múltiples disciplinas. | Combina ciencias de la computación, ciencias ambientales, ética y ciencias sociales. | Cowls et al. (2021) |
| **Consideración del ciclo de vida completo** | Evalúa la sostenibilidad a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema de IA. | Incluye métricas para consumo de energía, uso de materiales e impacto social desde la extracción de materiales hasta el fin de vida útil. | Gupta et al. (2021) |

Fuente: Elaboración propia

La tabla resume las características clave de la Inteligencia Artificial Sostenible (IA Sostenible), destacando los aspectos que la diferencian de enfoques tradicionales de la IA. La IA Sostenible no solo busca la eficiencia y el rendimiento, sino que también considera su impacto ambiental, social y ético a lo largo de todo su ciclo de vida.

De todo el examen anterior, se puede plantear que la IA sostenible es un campo multifacético que busca alinear el desarrollo y la aplicación de la IA con los objetivos de sostenibilidad global. Abarca conceptos como Green AI, IA responsable y la aplicación directa de la IA a problemas de sostenibilidad. A medida que el campo evoluciona, se espera que surjan definiciones y conceptos más refinados que ayuden a guiar el desarrollo de sistemas de IA que sean beneficiosos tanto para la humanidad como para el planeta a largo plazo.

**Convergencia histórica: IA y sostenibilidad**

Los orígenes de la Inteligencia Artificial (IA) se remontan a mediados del siglo XX, con las primeras conceptualizaciones teóricas sobre máquinas pensantes. Alan Turing, considerado uno de los padres de la computación, propuso en 1950 el famoso "Test de Turing" como una forma de evaluar la inteligencia de las máquinas. Este hito marcó el inicio de una era de investigación y desarrollo en el campo de la IA. En las décadas siguientes, se produjeron avances significativos, como el programa de juego de damas de Arthur Samuel en 1952, que introdujo el concepto de aprendizaje automático (Russell y Norvig, 2021).

La evolución de la IA ha sido marcada por ciclos de entusiasmo y períodos de desilusión, conocidos como "inviernos de la IA". Sin embargo, desde principios del siglo XXI, se ha presenciado un resurgimiento notable impulsado por el aumento en la potencia de cómputo, la disponibilidad de grandes conjuntos de datos y los avances en algoritmos de aprendizaje profundo. El hito de la victoria de AlphaGo sobre el campeón mundial de Go en 2016 demostró el potencial de la IA para superar capacidades humanas en tareas complejas (Silver et al., 2016).

Paralelamente, el concepto de sostenibilidad en el contexto tecnológico ha experimentado una evolución significativa. Inicialmente centrado en la eficiencia energética y la reducción de residuos electrónicos, el enfoque ha ampliado su alcance para abarcar aspectos sociales y éticos. La publicación del informe Brundtland en 1987 marcó un punto de inflexión al definir el desarrollo sostenible como aquel que "satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" (WCED, 1987). Este concepto ha influido profundamente en cómo se concibe la sostenibilidad en el desarrollo tecnológico.

La convergencia entre IA y sostenibilidad ha dado lugar a lo que actualmente se conoce como IA sostenible. Esta intersección se ha manifestado en varios hitos clave. Uno de los más significativos fue la publicación del informe "Tackling Climate Change with Machine Learning" por Rolnick et al. (2019), que identificó 13 áreas donde la IA puede contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático. Este trabajo catalizó numerosas investigaciones y aplicaciones prácticas de IA en sostenibilidad ambiental.

Otro hito importante fue el estudio de Vinuesa et al. (2020) sobre el papel de la IA en la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Los autores encontraron que la IA podría actuar como un facilitador para el 79% de los ODS, destacando el potencial transformador de esta tecnología en la búsqueda de un futuro más sostenible. Sin embargo, la convergencia entre IA y sostenibilidad también ha planteado desafíos significativos. Strubell et al. (2019) llamaron la atención sobre la huella de carbono del entrenamiento de grandes modelos de IA, estimando que el proceso podía emitir hasta 284 toneladas de CO2 equivalente. Este hallazgo ha impulsado investigaciones sobre "Green AI", un enfoque que busca desarrollar algoritmos más eficientes energéticamente sin comprometer el rendimiento (Schwartz et al., 2020).

La evolución de la IA sostenible continúa acelerándose, con iniciativas como el "AI for Good" de las Naciones Unidas y compromisos de grandes empresas tecnológicas para reducir su huella de carbono. Por ejemplo, Google ha anunciado su objetivo de operar con energía libre de carbono 24/7 para 2030, lo que tendrá un impacto significativo en la sostenibilidad de sus operaciones de IA (Google, 2020). El hecho es que, la convergencia entre IA y sostenibilidad representa una frontera clave en la tecnología moderna. A medida que se avanza en este campo, es imperativo que se continúen explorando nuevas formas de aprovechar el poder de la IA para abordar los desafíos de sostenibilidad global, mientras se asegura de que el desarrollo y despliegue de estos sistemas sea en sí mismo sostenible y ético.

**Principios clave del desarrollo sostenible aplicados a la Inteligencia Artificial**

En el contexto del desarrollo sostenible, la inteligencia artificial (IA) tiene un papel fundamental que desempeñar, dado que su aplicación puede influir significativamente en diversos aspectos sociales, económicos y ambientales. La integración de los principios del desarrollo sostenible en la IA es esencial para garantizar que los avances tecnológicos contribuyan positivamente a un futuro más equitativo y sostenible. A continuación, se discuten algunos de estos principios clave y su aplicación en el escenario de la IA (Tabla No. 2).

Tabla No.2: Principios Fundamentales del Desarrollo Sostenible Aplicados a la Inteligencia Artificial (IA)

| Principio | Descripción | Indicadores  |
| --- | --- | --- |
| **Eficiencia energética y reducción de la huella de carbono** | Desarrollar algoritmos y modelos energéticamente eficientes que minimicen el consumo de energía y las emisiones de carbono. | - Reducir el consumo de energía por unidad de cómputo en el entrenamiento de modelos de IA. - Utilizar fuentes de energía renovable para alimentar los centros de datos de IA. - Desarrollar hardware de IA más eficiente energéticamente. |
| **Equidad e inclusión** | Diseñar sistemas de IA transparentes, justos y que no discriminen a ningún grupo social. | - Implementar mecanismos para detectar y eliminar sesgos algorítmicos. - Garantizar la transparencia y la explicabilidad de las decisiones tomadas por los sistemas de IA. - Fomentar la participación de grupos diversos en el desarrollo y la implementación de sistemas de IA. |
| **Transparencia y responsabilidad** | Asegurar que los procesos y criterios de toma de decisiones de los sistemas de IA sean transparentes y explicables, y que existan mecanismos de rendición de cuentas. | - Implementar mecanismos de auditoría y supervisión para los sistemas de IA. - Desarrollar protocolos claros para la responsabilidad en caso de que los sistemas de IA generen resultados perjudiciales. - Educar al público sobre los riesgos y beneficios de la IA. |
| **Privacidad y protección de datos** | Respetar los derechos y la privacidad de las personas, garantizando la protección de los datos personales y sensibles. | - Cumplir con las regulaciones de privacidad de datos como el RGPD. - Implementar medidas de seguridad robustas para proteger los datos personales. - Otorgar a las personas control sobre sus datos personales y cómo se utilizan. |
| **Sostenibilidad ambiental** | Diseñar y utilizar sistemas de IA de manera que minimicen su impacto negativo en el medioambiente, en términos de consumo energético, generación de residuos y otros aspectos. | - Reducir el consumo de energía y las emisiones de carbono asociadas a los sistemas de IA. - Utilizar materiales y procesos de producción sostenibles para el hardware de IA. - Desarrollar estrategias de reciclaje y reutilización para los componentes de IA al final de su vida útil. |
| **Ética** | Desarrollar y utilizar la IA de manera ética y responsable, considerando sus implicaciones sociales, económicas y ambientales. | - Implementar principios éticos en el diseño y desarrollo de sistemas de IA. - Evaluar cuidadosamente el impacto potencial de los sistemas de IA antes de su implementación. - Fomentar el diálogo y la colaboración entre expertos en IA, ética y otras disciplinas. |
| **Beneficio social** | Desarrollar la IA con el objetivo de mejorar la calidad de vida de las personas y contribuir al bien común, en lugar de perseguir únicamente intereses comerciales o de poder. | - Utilizar la IA para abordar desafíos sociales y ambientales urgentes. - Fomentar el acceso equitativo a las tecnologías de IA. - Asegurar que los beneficios de la IA se distribuyan de manera justa entre diferentes sectores de la sociedad. |

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla anterior se podría deducir que la aplicación de los principios del desarrollo sostenible en el desarrollo y uso de la inteligencia artificial es significativa para garantizar que esta tecnología contribuya positivamente a un futuro sostenible. Esto implica no solo la eficiencia energética y la reducción de emisiones, sino también la equidad social, la sostenibilidad económica y la gestión responsable de los recursos naturales. La integración de estos principios puede asegurar que la IA no solo sea una herramienta poderosa para el progreso, sino también una fuerza para el bien social y ambiental.

**Teorías y modelos que sustentan la IA sostenible**

La inteligencia artificial sostenible se basa en una combinación de teorías y modelos que integran conceptos de sostenibilidad ambiental, eficiencia energética y equidad social. Uno de los modelos fundamentales es el de la economía circular, que se enfoca en la reutilización y reciclaje de recursos para minimizar el desperdicio y reducir el impacto ambiental. En el contexto de la IA, este modelo implica el diseño de algoritmos y sistemas que optimicen el uso de recursos energéticos y materiales a lo largo de su ciclo de vida.

Desde la perspectiva de las ciencias ambientales, modelos como la economía circular y la ecología industrial ofrecen pautas para diseñar sistemas de IA que minimicen su huella ecológica. Según Strubell et al. (2019), la eficiencia energética y la reducción de emisiones de carbono son aspectos clave a tener en cuenta en el desarrollo de aplicaciones de IA. También es relevante el modelo de la ética de la IA, que se sustenta en teorías como la ética kantiana y el utilitarismo. Autores como Floridi et al. (2018) proponen principios éticos como la transparencia, la rendición de cuentas y la justicia, los cuales deben guiar el desarrollo de la IA. Asimismo, Cath (2018) destaca la importancia de la ética del cuidado y la consideración de los impactos sociales y ambientales en la gobernanza de la IA.

El modelo de triple resultado, también conocido como "triple bottom line," se aplica a la IA sostenible. Este modelo considera el impacto de las tecnologías en tres dimensiones: económica, social y ambiental. El objetivo es desarrollar sistemas de IA que no solo sean rentables y eficientes, sino que también contribuyan positivamente al bienestar social y a la protección del medio ambiente (Elkington, 1998).

Otro enfoque relevante es el de la IA verde, que se centra en la creación de algoritmos y hardware energéticamente eficientes. Este enfoque es crucial dado que la demanda energética de los centros de datos y los procesos de entrenamiento de modelos de IA puede ser significativa. Por ejemplo, Strubell, Ganesh y McCallum (2019) demostraron que el entrenamiento de grandes modelos de procesamiento del lenguaje natural (NLP) puede tener una huella de carbono considerable, destacando la necesidad de innovaciones en eficiencia energética.

La intersección entre IA y sostenibilidad también se manifiesta en el concepto de "ciudades inteligentes sostenibles". Yigitcanlar et al. (2020) examinan cómo la IA puede contribuir a la planificación y gestión urbana sostenible. Los autores destacan aplicaciones como la optimización del tráfico, la gestión eficiente de recursos y la mejora de los servicios públicos, demostrando cómo la IA puede integrarse con la planificación urbana para crear ciudades más sostenibles.

**Interdisciplinariedad: Conexiones entre IA, Ciencias Ambientales y Sociales**

La naturaleza interdisciplinaria de la IA sostenible implica la integración de conocimientos y métodos de las ciencias ambientales, las ciencias sociales y la ingeniería. Esta integración es crucial para abordar los complejos desafíos que plantea la sostenibilidad.

Desde la perspectiva de las ciencias ambientales, la IA puede utilizarse para modelar y predecir el cambio climático, optimizar el uso de recursos naturales y monitorear la biodiversidad. Por ejemplo, los algoritmos de aprendizaje automático se están utilizando para analizar grandes conjuntos de datos climáticos y mejorar las predicciones de eventos extremos, como huracanes y sequías (Rolnick et al., 2019).

En el ámbito de las ciencias sociales, la IA puede ayudar a comprender y abordar problemas sociales complejos, como la desigualdad y la justicia ambiental. Los modelos de IA pueden analizar datos sociales y económicos para identificar patrones y tendencias que informen políticas más efectivas y equitativas. Esto requiere una colaboración estrecha entre científicos de datos, sociólogos y economistas para desarrollar soluciones integrales y sostenibles. En este ámbito, la colaboración interdisciplinaria es fundamental para el desarrollo de soluciones de IA que sean tanto tecnológicamente avanzadas como social y ambientalmente responsables. Esta colaboración permite la creación de sistemas de IA que no solo son eficientes y efectivos, sino también justos y sostenibles.

**Debates actuales**

Los debates actuales en el campo de la Inteligencia Artificial Sostenible abarcan una amplia gama de temas, reflejando la complejidad y la naturaleza multidisciplinaria de este campo emergente. Uno de los debates más prominentes gira en torno a la tensión entre la eficiencia energética y el rendimiento de los sistemas de IA. Schwartz et al. (2020) han propuesto el concepto de "Green AI", argumentando que la eficiencia computacional debería ser un criterio de evaluación tan importante como la precisión. Este debate subraya la necesidad de equilibrar el desarrollo de modelos de IA cada vez más potentes con la urgencia de reducir su huella de carbono y consumo energético.

Otro tema candente es la cuestión de los sesgos y la equidad en los sistemas de IA, especialmente cuando se aplican a problemas de sostenibilidad. Gebru et al. (2021) han señalado la importancia crucial de considerar la diversidad y la inclusión en el desarrollo de IA. Este debate se centra en cómo los sesgos en los datos y algoritmos pueden perpetuar o exacerbar desigualdades existentes, un problema particularmente preocupante cuando la IA se aplica a cuestiones de sostenibilidad que a menudo afectan desproporcionadamente a comunidades marginadas.

La gobernanza y regulación de la IA sostenible es otro tema de intenso debate. La Comisión Europea ha propuesto un marco regulatorio para la IA que incluye consideraciones de sostenibilidad (European Commission, 2021), pero la implementación efectiva y el alcance global de tales regulaciones siguen siendo temas de discusión. Este debate se centra en cómo equilibrar la necesidad de innovación con la protección de los derechos individuales y la promoción de resultados sostenibles.

La medición precisa del impacto de la IA en la sostenibilidad es otro tema de debate significativo. Mientras que estudios como el de Vinuesa et al. (2020) han intentado mapear el impacto de la IA en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, existe un consenso creciente sobre la necesidad de desarrollar métricas más detalladas y específicas. Este debate subraya la complejidad de cuantificar de manera holística los efectos tanto positivos como negativos de las aplicaciones de IA en diversos aspectos de la sostenibilidad.

El equilibrio entre la privacidad y el beneficio público en el contexto de la IA sostenible también es un tema de debate continuo. Muchas aplicaciones de IA para la sostenibilidad requieren grandes cantidades de datos, lo que plantea preocupaciones sobre la privacidad individual y la seguridad de los datos. Este debate se centra en cómo reconciliar la necesidad de datos para desarrollar soluciones efectivas con la protección de los derechos individuales y la privacidad.

Estos debates reflejan la complejidad y la importancia del campo de la IA sostenible. Subrayan la necesidad de un enfoque interdisciplinario y colaborativo para abordar los desafíos técnicos, éticos y sociales que surgen en la intersección de la IA y la sostenibilidad. A medida que el campo continúa evolucionando, es probable que estos debates se intensifiquen y surjan nuevos temas de discusión, moldeando el futuro desarrollo y aplicación de la IA en el contexto de la sostenibilidad global.

**Aplicaciones actuales de la IA en áreas de sostenibilidad**

La implementación de la inteligencia artificial (IA) en iniciativas de sostenibilidad está ganando tracción a nivel global, con varios países adoptando estas tecnologías para abordar desafíos ambientales y económicos. A continuación, se presentan casos específicos de países donde la IA se ha utilizado de manera efectiva en áreas de sostenibilidad.

En **Estados Unidos**, Google ha empleado IA para optimizar el consumo de energía en sus centros de datos. Mediante el uso de algoritmos desarrollados por DeepMind, Google ha logrado reducir la cantidad de energía utilizada para enfriar sus centros de datos en un 40%, lo que ha resultado en una significativa reducción de sus emisiones de carbono (Evans & Gao, 2016). Además, en San Francisco, la compañía Recology utiliza sistemas de IA para mejorar la eficiencia del reciclaje. Los sistemas de reconocimiento de objetos han permitido aumentar la tasa de reciclaje y reducir la cantidad de residuos destinados a los vertederos, contribuyendo a los objetivos de cero residuos de la ciudad (Recology, 2020).

En **India**, la IA está siendo utilizada para mejorar la agricultura de precisión. La plataforma Watson Decision Platform for Agriculture de IBM ha sido implementada para ayudar a los agricultores a tomar decisiones informadas basadas en datos climáticos y del suelo. Esta tecnología ha permitido aumentar la productividad y reducir el uso de recursos como el agua y los fertilizantes, contribuyendo a una agricultura más sostenible (IBM, 2020). Además, la startup indiana CropIn utiliza IA para ofrecer soluciones de monitoreo de cultivos, predicción de rendimiento y gestión de riesgos, beneficiando a miles de agricultores en todo el país.

**Kenia** ha adoptado la IA para la conservación del medio ambiente. La organización Rainforest Connection utiliza dispositivos de escucha equipados con tecnología de reconocimiento de sonido para monitorear y proteger los bosques tropicales. Estos dispositivos detectan sonidos de actividades ilegales, como la tala, y alertan a los guardabosques en tiempo real. Esta tecnología ha sido efectiva en la prevención de la deforestación ilegal y la protección de la biodiversidad en las regiones forestales de Kenia (Rainforest Connection, 2019).

En **Japón**, la IA se ha aplicado en la gestión de recursos naturales y la eficiencia energética. Tokyo Electric Power Company (TEPCO) utiliza sistemas de IA para predecir el consumo de energía y optimizar la distribución eléctrica. Esta tecnología ha mejorado la eficiencia energética y reducido los costos operativos, al mismo tiempo que ha disminuido la huella de carbono de la compañía (TEPCO, 2019). Además, Japón está explorando el uso de IA en la gestión de residuos y el reciclaje, con iniciativas que incluyen el desarrollo de robots capaces de clasificar y procesar residuos de manera más eficiente.

En América Latina y el Caribe, la inteligencia artificial (IA) está siendo implementada en diversas áreas para promover la sostenibilidad y abordar desafíos ambientales, sociales y económicos. En **Brasil**, la IA se está utilizando para monitorear la deforestación en la Amazonía. La organización de investigación Imazon ha desarrollado el sistema de alerta de deforestación (SAD), que utiliza imágenes de satélite y algoritmos de IA para detectar y reportar actividades de deforestación en tiempo real. Este sistema ha sido crucial para la conservación de la Amazonía, proporcionando datos precisos y oportunos que permiten a las autoridades tomar medidas rápidas contra la tala ilegal (Imazon, 2020). Además, en el sector agrícola, la empresa brasileña AgroSmart utiliza IA para proporcionar a los agricultores datos precisos sobre el clima, el suelo y los cultivos, mejorando la eficiencia y sostenibilidad de las prácticas agrícolas.

En **México**, la IA está siendo aplicada para mejorar la gestión del agua. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha implementado sistemas de IA para optimizar el uso y la distribución del agua en el país. Estos sistemas utilizan datos en tiempo real para predecir patrones de consumo y gestionar los recursos hídricos de manera más eficiente, contribuyendo a la sostenibilidad del agua en una región frecuentemente afectada por la escasez (CONAGUA, 2021). Además, la empresa mexicana CEMEX ha desarrollado una plataforma llamada "CEMEX Go," que utiliza IA para optimizar la cadena de suministro y reducir las emisiones de carbono en la producción de cemento.

En **Chile**, la IA está siendo utilizada para promover la eficiencia energética. La empresa chilena Enel Distribución ha implementado un sistema de gestión de redes inteligentes (smart grids) que utiliza IA para optimizar la distribución de electricidad y reducir las pérdidas de energía. Este sistema permite una gestión más eficiente de la red eléctrica, lo que contribuye a la sostenibilidad energética del país (Enel, 2019). Asimismo, en la minería, un sector clave en Chile, la empresa CODELCO ha adoptado tecnologías de IA para optimizar procesos y reducir el impacto ambiental de sus operaciones mineras.

En **Colombia**, la IA se está aplicando en la conservación de la biodiversidad. La organización Wildlife Conservation Society (WCS) utiliza sistemas de IA para analizar datos de cámaras trampa y monitorear la fauna en áreas protegidas. Estos sistemas permiten identificar y contar automáticamente a los animales, proporcionando datos cruciales para la conservación y gestión de la biodiversidad (WCS, 2020). Además, en el sector agrícola, la plataforma "Colombian Agriculture 4.0" utiliza IA para ayudar a los agricultores a mejorar la productividad y sostenibilidad de sus cultivos mediante el análisis de datos agrícolas y climáticos.

Estos ejemplos ilustran cómo diversos países, incluyendo los de América Latina y el Caribe, están adoptando la IA para promover la sostenibilidad en múltiples sectores. Desde la conservación de la biodiversidad y la gestión de recursos naturales hasta la agricultura de precisión, la eficiencia energética y la gestión de residuos, la IA está ayudando a abordar desafíos ambientales complejos y a fomentar prácticas más sostenibles en la región y más allá. Esta tecnología demuestra su potencial para impulsar soluciones innovadoras que contribuyen a la protección del medio ambiente y al uso más eficiente de los recursos naturales.

**Impacto y desafíos**

La implementación de la inteligencia artificial (IA) en sostenibilidad tiene implicaciones profundas en los ámbitos ambiental, social y económico. Desde una perspectiva ambiental, la IA puede optimizar el uso de recursos naturales, reducir emisiones de carbono y mejorar la eficiencia energética. Por ejemplo, los algoritmos de aprendizaje automático pueden analizar datos climáticos para predecir fenómenos meteorológicos extremos, ayudando a mitigar sus efectos (Rolnick et al., 2019). En el sector energético, Google ha utilizado IA para reducir el consumo de energía en sus centros de datos en un 15%, resultando en una significativa disminución de su huella de carbono (Evans & Gao, 2016).

En términos sociales, la IA puede contribuir a la equidad y la inclusión mediante la personalización de servicios educativos y de salud, adaptados a las necesidades específicas de diversas comunidades. Sin embargo, también existe el riesgo de perpetuar desigualdades si los datos utilizados están sesgados. Por ejemplo, el uso de IA en sistemas de justicia penal ha sido criticado por amplificar sesgos raciales presentes en los datos históricos (O'Neil, 2016). Económicamente, la IA puede impulsar la productividad y la innovación, creando nuevas oportunidades de empleo en sectores tecnológicos avanzados. Sin embargo, también puede llevar a la automatización de trabajos, desplazando a trabajadores en sectores tradicionales. Este doble filo requiere políticas laborales y educativas que faciliten la transición de la fuerza laboral hacia roles complementarios a la IA (Brynjolfsson & McAfee, 2014).

*Identificación de barreras y desafíos en la implementación*

La implementación de la IA sostenible enfrenta múltiples barreras y desafíos. Un obstáculo significativo es la falta de infraestructura adecuada en muchas regiones, especialmente en países en desarrollo, donde la conectividad y el acceso a tecnologías avanzadas son limitados. Además, la recopilación y gestión de datos de alta calidad es un desafío crucial, ya que los algoritmos de IA dependen de grandes cantidades de datos precisos y representativos.

Otro desafío es la resistencia cultural y organizacional al cambio. Las organizaciones pueden ser reticentes a adoptar nuevas tecnologías debido a la falta de comprensión y confianza en la IA. Este problema se puede mitigar mediante la educación y la formación adecuadas, así como la implementación de políticas claras que garanticen la transparencia y la responsabilidad en el uso de la IA (West et al., 2019).

Además, la regulación y gobernanza de la IA presentan desafíos importantes. Existen pocos marcos regulatorios robustos que aborden los aspectos éticos y de seguridad de la IA, lo que puede conducir a usos irresponsables o perjudiciales de la tecnología. La creación de normas internacionales y regulaciones nacionales específicas es esencial para garantizar el desarrollo y uso responsable de la IA (Cath et al., 2018).

*Análisis de riesgos y consideraciones éticas*

La implementación de la IA sostenible conlleva tanto beneficios como riesgos significativos. Entre los principales beneficios se encuentran la mejora en la eficiencia de recursos, la reducción de impactos ambientales y la promoción de la equidad social. Por ejemplo, la optimización del transporte mediante IA puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al mejorar la eficiencia de las rutas y el uso de vehículos eléctricos (Schmidt & Weigt, 2013).

Sin embargo, los riesgos asociados con la IA incluyen la privacidad y la seguridad de los datos. La recopilación y análisis de grandes cantidades de datos personales pueden resultar en violaciones de privacidad si no se gestionan adecuadamente. Además, existe el riesgo de ciberataques que puedan comprometer sistemas críticos de IA, afectando infraestructuras esenciales como la red eléctrica o los sistemas de salud (Brundage et al., 2018).

Las consideraciones éticas incluyen la necesidad de asegurar que la IA no perpetúe sesgos y desigualdades. Es crucial desarrollar algoritmos que sean transparentes y auditables para prevenir decisiones injustas o discriminatorias. Además, la gobernanza ética de la IA requiere la participación de una amplia gama de actores, incluyendo gobiernos, empresas, y la sociedad civil, para garantizar que los beneficios de la IA se distribuyan equitativamente (Floridi et al., 2018).

*Medición y evaluación del impacto de la IA en términos de sostenibilidad*

La evaluación del impacto de la Inteligencia Artificial (IA) en términos de sostenibilidad ambiental, social y económica requiere un enfoque integral y multidimensional. Para medir y evaluar el impacto de la IA en términos de sostenibilidad, se pueden utilizar diversas métricas y metodologías. Un enfoque común es el uso de indicadores de desempeño ambiental, como la huella de carbono, el consumo de agua y la eficiencia energética. Estos indicadores pueden proporcionar una visión cuantitativa del impacto ambiental de los sistemas de IA (Strubell et al., 2019). La evaluación también debe incluir estudios cualitativos que capturen las percepciones y experiencias de las comunidades afectadas por la implementación de IA. Esto puede incluir encuestas, entrevistas y grupos focales que proporcionen una comprensión más profunda de los impactos sociales y económicos de la IA (West et al., 2019).

En cuanto al impacto ambiental, es crucial analizar el consumo de energía de los sistemas de IA, especialmente durante el entrenamiento de los modelos de aprendizaje automático, así como las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a su funcionamiento. Además, se debe considerar el uso de recursos hídricos, materiales y otros recursos necesarios, y evaluar los posibles efectos negativos en la biodiversidad. Algunos indicadores clave serían las emisiones de CO2 por unidad de cómputo, el consumo de energía por modelo de IA y el uso de materiales sostenibles en el hardware.

En el ámbito social, es fundamental analizar si los sistemas de IA están libres de sesgos algorítmicos que puedan discriminar a ciertos grupos. También es importante evaluar el impacto en el empleo, considerando el potencial de desplazamiento de trabajos y la necesidad de políticas de transición laboral. Asimismo, se debe considerar cómo la IA puede mejorar la calidad de vida, el acceso a servicios y la inclusión social. Indicadores relevantes serían los niveles de sesgo en conjuntos de datos y algoritmos, el impacto en la distribución de beneficios y el acceso a la educación y oportunidades laborales relacionadas con la IA.

En cuanto al impacto económico, se debe evaluar cómo la IA puede aumentar la eficiencia y la productividad en diversos sectores, así como su potencial para impulsar el crecimiento económico sostenible (Consulte Tabla No 3). También es importante analizar la creación de nuevos empleos en sectores relacionados con la IA y evaluar el riesgo de concentración de riqueza en manos de grandes empresas tecnológicas. Algunos indicadores clave serían la productividad laboral aumentada, los nuevos empleos creados, la tasa de desempleo atribuible a la automatización y la distribución de los beneficios económicos de la IA.

Tabla No 3. Evaluación del Impacto de la IA Sostenible: Consideraciones ambientales, sociales y económicas

| Aspecto | Descripción | Impactos Potenciales | Indicadores Clave |
| --- | --- | --- | --- |
| **Ambiental** | Consumo de energía, emisiones de carbono, uso de recursos, impacto en la biodiversidad. | - Huella de carbono de los sistemas de IA (por ejemplo, entrenamiento de modelos). - Impacto en el uso de recursos hídricos y energéticos. - Potencial para la reducción de la contaminación y la eficiencia energética. | - Emisiones de CO2 por unidad de cómputo. - Consumo de energía por modelo de IA. - Uso de materiales sostenibles en hardware de IA. |
| **Social** | Equidad, inclusión, sesgos algorítmicos, impacto en el empleo, bienestar social. | - Exacerbación de desigualdades existentes si no se consideran los sesgos. - Discriminación en procesos como la selección de personal o la concesión de préstamos. - Potencial para mejorar la calidad de vida y el acceso a servicios. | - Niveles de sesgo en los conjuntos de datos y algoritmos de IA. - Impacto en la distribución de beneficios de la IA. - Acceso a la educación y oportunidades laborales relacionadas con la IA. |
| **Económico** | Eficiencia, productividad, crecimiento económico, creación de empleos, distribución de la riqueza. | - Automatización de tareas y aumento de la eficiencia. - Creación de nuevos empleos en sectores relacionados con la IA. - Riesgo de desplazamiento laboral en algunos sectores. - Concentración de riqueza en manos de grandes empresas tecnológicas. | - Productividad laboral aumentada gracias a la IA. - Nuevos empleos creados en IA y sectores relacionados. - Tasa de desempleo atribuible a la automatización. - Distribución de los beneficios económicos de la IA. |

Fuente: Elaboración propia

**Inteligencia Artificial Sostenible: Contribuciones, barreras y estrategias para el futuro**

La Inteligencia Artificial (IA) tiene un potencial significativo para contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. La IA puede mejorar la eficiencia en la gestión de recursos naturales, optimizar el uso de energía y reducir las emisiones de carbono. Por ejemplo, en el sector agrícola, la IA facilita la agricultura de precisión, permitiendo un uso más eficiente del agua y los fertilizantes, lo que contribuye a los ODS 2 (Hambre Cero) y 12 (Producción y Consumo Responsables) (Fundación SERES, 2015). Además, la IA puede ayudar a predecir y mitigar los efectos del cambio climático mediante modelos predictivos y sistemas de alerta temprana, apoyando el ODS 13 (Acción por el Clima) (UIK, 2021).

*Barreras para la adopción generalizada de IA Sostenible*

A pesar de sus beneficios, la adopción generalizada de la IA sostenible enfrenta varias barreras técnicas, económicas y sociales. Técnicamente, el desarrollo de algoritmos eficientes y la infraestructura necesaria para soportar grandes volúmenes de datos son desafíos significativos. Económicamente, los altos costos iniciales de implementación y la falta de incentivos financieros pueden desalentar a las empresas y gobiernos. Socialmente, la falta de conocimiento y habilidades en IA, así como la resistencia al cambio, son obstáculos importantes (Sostenibilidad.com., 2021).

*Políticas y regulaciones necesarias*

Para fomentar el desarrollo y la implementación de IA sostenible, es crucial establecer políticas y regulaciones adecuadas. Estas deben incluir incentivos fiscales para empresas que adopten tecnologías sostenibles, así como normativas que aseguren la transparencia y la ética en el uso de la IA. La Unión Europea, por ejemplo, ha propuesto regulaciones para garantizar que los sistemas de IA sean seguros, transparentes y respetuosos con los derechos fundamentales (CIECEM, 2024). Además, es esencial promover la educación y la formación en IA sostenible para crear una fuerza laboral capacitada.

*Equilibrio entre eficiencia y impacto ambiental*

Equilibrar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de IA con su impacto ambiental es un desafío crítico. Una estrategia efectiva es el desarrollo de algoritmos más eficientes energéticamente y el uso de fuentes de energía renovable para alimentar los centros de datos. Investigaciones han demostrado que el entrenamiento de modelos de IA puede ser altamente intensivo en energía, por lo que optimizar estos procesos es fundamental para reducir su huella de carbono (DASCi, 2024).

*Colaboraciones entre industria, academia y gobierno*

Las colaboraciones entre la industria, la academia y el gobierno son esenciales para avanzar en la IA sostenible. Estas alianzas pueden facilitar la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías, así como la implementación de políticas efectivas. Por ejemplo, iniciativas como "AI for Good" de la UIT buscan aprovechar el poder de la IA para abordar desafíos globales y acelerar el progreso hacia los ODS mediante la colaboración entre diferentes sectores.

*Abordar desigualdades sociales y económicas*

La IA sostenible también tiene el potencial de abordar desigualdades sociales y económicas. Al mejorar el acceso a la educación y la salud mediante tecnologías de IA, se pueden reducir las brechas existentes. Además, la IA puede facilitar la creación de empleos en sectores emergentes, contribuyendo a una distribución más equitativa de los beneficios económicos.

 *Estrategias para avanzar en la implementación de la IA sostenible*

Para avanzar en la implementación de la IA sostenible, se deben desarrollar estrategias específicas (Data Innovation, 2024; Techopedia, 2024). Primero, es fundamental integrar consideraciones éticas y de sostenibilidad desde el diseño y desarrollo de soluciones de IA, adoptando principios de IA ética y transparente. Segundo, promover la colaboración entre sectores para fomentar el uso responsable de la IA, uniéndose a iniciativas globales que favorezcan las prácticas sostenibles y éticamente responsables. Tercero, invertir en tecnologías e infraestructura que optimicen el uso de recursos, reduzcan las emisiones de carbono y mejoren la eficiencia energética.

La investigación sobre la IA sostenible es fundamental para garantizar que el avance tecnológico no se produzca a expensas del medio ambiente y el bienestar social. Al abordar las barreras existentes y promover políticas y colaboraciones efectivas, es posible maximizar el potencial de la IA para contribuir a un futuro más sostenible y equitativo.

El diseño e implementación de sistemas de IA que maximicen los beneficios para la sostenibilidad mientras minimizan los impactos negativos requiere un enfoque holístico que considere aspectos técnicos, éticos y ambientales desde las etapas iniciales de desarrollo. Según Vinuesa et al. (2020), es fundamental integrar consideraciones de sostenibilidad en todo el ciclo de vida de los sistemas de IA, desde la conceptualización hasta el despliegue y mantenimiento. Esto implica optimizar el uso de recursos computacionales, seleccionar cuidadosamente los conjuntos de datos de entrenamiento y evaluar continuamente el impacto ambiental y social de las aplicaciones de IA.

Para garantizar el desarrollo responsable de la IA sostenible, es necesario establecer marcos regulatorios y éticos sólidos. La Unión Europea ha sido pionera en este aspecto con su propuesta de Reglamento de Inteligencia Artificial, que busca establecer estándares para el desarrollo y uso ético de la IA (Comisión Europea, 2021). Este marco propone un enfoque basado en el riesgo, clasificando las aplicaciones de IA según su potencial impacto en la sociedad y el medio ambiente. Complementariamente, iniciativas como los Principios de IA de la OCDE proporcionan directrices éticas para el desarrollo de IA centrada en el ser humano y respetuosa con el medio ambiente (OCDE, 2019).

En cuanto a las mejores prácticas para medir y reducir la huella de carbono de los sistemas de IA, Strubell et al. (2019) proponen un enfoque multifacético que incluye la optimización de algoritmos, la selección de hardware eficiente y el uso de energías renovables en centros de datos. Por ejemplo, su estudio reveló que el entrenamiento de un modelo de procesamiento de lenguaje natural puede emitir hasta 284 toneladas de CO2, equivalente a cinco veces las emisiones de un automóvil durante su vida útil. Para abordar este problema, empresas como Google están implementando técnicas de "IA verde", que incluyen el uso de algoritmos más eficientes y la optimización de la infraestructura de centros de datos (Gupta et al., 2020).

La medición precisa de la huella de carbono de los sistemas de IA es crucial para identificar áreas de mejora. Henderson et al. (2020) proponen una metodología estandarizada para reportar el consumo energético y las emisiones de CO2 asociadas con el entrenamiento y despliegue de modelos de IA. Esta metodología incluye la consideración de factores como la eficiencia del hardware, la fuente de energía utilizada y la duración del entrenamiento del modelo.

Además de estas medidas técnicas, es importante fomentar la colaboración interdisciplinaria entre expertos en IA, científicos ambientales y responsables políticos. Rolnick et al. (2019) argumentan que esta colaboración es esencial para desarrollar soluciones de IA que aborden directamente los desafíos de sostenibilidad, como la mitigación del cambio climático y la conservación de la biodiversidad.

La idea es que, el desarrollo de IA sostenible requiere un enfoque integral que combine innovación tecnológica, marcos regulatorios sólidos y prácticas responsables de desarrollo y despliegue. Solo a través de estos esfuerzos coordinados podremos aprovechar el potencial de la IA para abordar los desafíos globales de sostenibilidad mientras minimizamos sus impactos negativos.

**Tendencias futuras y recomendaciones**

Las tendencias futuras y recomendaciones para la IA sostenible apuntan hacia un desarrollo más responsable y alineado con los objetivos de sostenibilidad global. Según Vinuesa et al. (2020), se proyecta que la IA tendrá un impacto significativo en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, con potencial para influir positivamente en el 79% de estos objetivos. Sin embargo, también advierten sobre los posibles efectos negativos si no se implementa de manera responsable, lo que subraya la necesidad de un enfoque equilibrado.

Las proyecciones futuras de la IA sostenible sugieren un aumento significativo en la adopción de tecnologías que integren principios de sostenibilidad. Según estudios como el realizado por PwC (2019), se espera que para el año 2030, la IA tenga un impacto sustancial en la mejora de la eficiencia energética, la gestión de recursos y la mitigación de riesgos ambientales. Esto incluye aplicaciones avanzadas en agricultura de precisión, monitoreo ambiental y predicción de impactos climáticos (Floridi et al., 2018).

Para respaldar estas proyecciones de manera efectiva, es crucial establecer políticas y regulaciones sólidas que guíen el desarrollo ético y responsable de la IA. Propuestas como el Acta de Inteligencia Artificial de la Comisión Europea (2021) buscan proporcionar un marco normativo que aborde temas críticos como la transparencia, la equidad y la responsabilidad al utilizar IA en diversos sectores. Este tipo de regulaciones son fundamentales para mitigar riesgos asociados, como el sesgo algorítmico y la falta de privacidad de los datos (Binns, 2018).

En cuanto a las propuestas de políticas y regulaciones, la Unión Europea está liderando el camino con su propuesta de Reglamento de Inteligencia Artificial, que busca establecer un marco normativo para el desarrollo y uso ético de la IA (Comisión Europea, 2021). Este enfoque basado en el riesgo podría servir como modelo para otras regiones, promoviendo la innovación mientras se protegen los derechos fundamentales y se garantiza la sostenibilidad.

Para la industria, las recomendaciones se centran en la adopción de prácticas de "IA verde". Gupta et al. (2020) proponen estrategias como la optimización de algoritmos para reducir el consumo energético, el uso de energías renovables en centros de datos y la consideración del impacto ambiental en todo el ciclo de vida de los sistemas de IA. Por ejemplo, Google ha logrado reducir el consumo energético de sus centros de datos en un 50% mediante el uso de IA para optimizar la refrigeración.

La industria puede jugar un papel clave al invertir en tecnologías sostenibles y alinear sus estrategias comerciales con los ODS de la ONU. Por ejemplo, la colaboración entre empresas tecnológicas y organizaciones ambientales puede acelerar la innovación en soluciones de IA que beneficien tanto a la economía como al medio ambiente (Rolnick et al., 2019).

En el ámbito académico, se recomienda fomentar la investigación interdisciplinaria que combine la ciencia de la computación con las ciencias ambientales y sociales. Rolnick et al. (2019) destacan la importancia de desarrollar aplicaciones de IA específicamente diseñadas para abordar desafíos de sostenibilidad, como la mitigación del cambio climático y la conservación de la biodiversidad.

Los gobiernos, por su parte, deben promover incentivos fiscales y financiamiento para proyectos de IA sostenible, así como proporcionar apoyo en la formulación de políticas que fomenten la adopción responsable de la tecnología. La academia tiene un rol fundamental en la educación y capacitación de profesionales en ética de IA y en la investigación de nuevas metodologías que minimicen los impactos negativos.

Además de establecer marcos regulatorios, se sugiere a los gobiernos, invertir en infraestructura digital sostenible y promover la colaboración público-privada en proyectos de IA para el bien común. La iniciativa "AI for Good" de la UIT es un ejemplo de cómo se pueden catalizar esfuerzos globales para aplicar la IA en la consecución de los ODS (UIT, 2021).

En general para avanzar hacia una IA más sostenible, se requiere la colaboración entre la industria, los gobiernos y la academia. Biehl et al. (2022) sugieren que la industria debe adoptar prácticas de diseño y desarrollo de IA que prioricen la eficiencia energética, el reciclaje y la reducción de la huella de carbono. Asimismo, los gobiernos deben promulgar políticas y marcos regulatorios que fomenten la innovación sostenible en IA, y la academia debe impulsar la investigación en áreas como la optimización de algoritmos y la evaluación del ciclo de vida de los sistemas de IA.

Una tendencia emergente es el desarrollo de métricas estandarizadas para evaluar el impacto ambiental de los sistemas de IA. Henderson et al. (2020) proponen una metodología para reportar el consumo energético y las emisiones de CO2 asociadas con el entrenamiento y despliegue de modelos de IA, lo que podría convertirse en un estándar de la industria en el futuro cercano.

El futuro de la IA sostenible dependerá de la colaboración entre múltiples actores para desarrollar tecnologías que no solo sean innovadoras, sino también responsables y alineadas con los objetivos de sostenibilidad global. La implementación de políticas adecuadas, la adopción de prácticas sostenibles por parte de la industria y la investigación continua en aplicaciones de IA para el desarrollo sostenible serán fundamentales para aprovechar el potencial de esta tecnología en beneficio de la sociedad y el medio ambiente.

**Discusión**

La investigación propuesta sobre Inteligencia Artificial Sostenible aborda una temática crucial en el contexto actual, donde la IA se posiciona como una herramienta fundamental para enfrentar los desafíos de sostenibilidad global. Este estudio se distingue por su enfoque integral, que busca desarrollar un marco que abarque aspectos técnicos, éticos, sociales y ambientales de la IA sostenible.

En comparación con investigaciones previas, este estudio adopta una perspectiva más holística. Mientras que trabajos anteriores se han centrado en aplicaciones específicas de la IA para la sostenibilidad, como la optimización de recursos o la predicción de patrones climáticos, esta investigación busca crear un marco general para la implementación responsable de la IA. Por ejemplo, un estudio reciente de Vinuesa et al. (2020) analizó el impacto de la IA en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, pero se limitó a evaluar los efectos potenciales sin proponer un marco integral para su implementación.

Las implicaciones teóricas de este estudio son significativas. Al abordar cómo diseñar sistemas de IA que maximicen los beneficios para la sostenibilidad mientras minimizan los impactos negativos, se podría establecer un nuevo paradigma en el desarrollo de tecnologías de IA. Esto podría llevar a la formulación de principios teóricos que guíen el diseño de sistemas de IA más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. Como señalan Cowls et al. (2021), es crucial desarrollar un marco ético para la IA que considere no solo su eficacia, sino también su impacto ambiental y social.

Desde el punto de vista metodológico, el enfoque multidisciplinario propuesto, que combina análisis técnicos, éticos y ambientales, podría establecer un nuevo estándar para la evaluación de tecnologías de IA. Este enfoque va más allá de las métricas de rendimiento tradicionales para incluir consideraciones de sostenibilidad y responsabilidad social. El desarrollo de métodos para medir y reducir la huella de carbono de los sistemas de IA es particularmente relevante, dado que estudios recientes han demostrado que el entrenamiento de modelos de IA grandes puede generar emisiones de CO2 significativas. Por ejemplo, Strubell et al. (2019) estimaron que el entrenamiento de un solo modelo de procesamiento de lenguaje natural puede emitir tanto CO2 como cinco automóviles durante toda su vida útil.

Las implicaciones prácticas de este estudio son potencialmente transformadoras. El marco propuesto para la implementación de IA sostenible podría guiar a las empresas en el desarrollo de productos y servicios más respetuosos con el medio ambiente. Además, las recomendaciones sobre marcos regulatorios y éticos podrían informar a los responsables políticos en la creación de normativas que fomenten la innovación responsable en IA. Esto es particularmente relevante dado que, según un informe de PwC (2018), la IA podría contribuir hasta $15.7 billones a la economía global para 2030, pero este crecimiento debe gestionarse de manera sostenible.

Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones potenciales de este estudio. La rápida evolución de la tecnología de IA podría hacer que algunas recomendaciones se vuelvan obsoletas rápidamente. Además, la implementación práctica de las recomendaciones podría enfrentar desafíos debido a las diferencias en regulaciones y prácticas entre diferentes países y sectores industriales. Como señalan Vinuesa et al. (2020), la adopción de IA para la sostenibilidad puede verse obstaculizada por la falta de infraestructura adecuada en países en desarrollo.

Este estudio abre varias vías para futuras investigaciones. Se podrían realizar estudios más detallados sobre la implementación de IA sostenible en sectores específicos, como energía, transporte o agricultura. También sería valioso investigar los impactos a largo plazo de la adopción de prácticas de IA sostenible en la economía global y el medio ambiente. Además, se podrían explorar más a fondo las implicaciones éticas y sociales de la IA sostenible, incluyendo cuestiones de equidad y acceso a la tecnología.

En conclusión, esta investigación tiene el potencial de hacer una contribución significativa al campo emergente de la IA sostenible, proporcionando un marco integral que podría guiar el desarrollo futuro de esta tecnología crítica de una manera que sea beneficiosa tanto para la humanidad como para el planeta

**Conclusiones generales**

La investigación sobre "Inteligencia Artificial Sostenible: Orígenes y Evolución" ofrece una visión integral y multidisciplinaria sobre cómo la IA puede ser desarrollada y utilizada de manera que maximice sus beneficios para la sostenibilidad mientras minimiza sus impactos negativos. A través del análisis de casos de uso exitosos, la identificación de desafíos actuales y la propuesta de estrategias alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se han derivado varias conclusiones clave.

El diseño e implementación de sistemas de IA sostenibles requieren un enfoque holístico que considere no solo la eficiencia técnica, sino también los impactos ambientales y sociales. La adopción de prácticas como el uso de energías renovables para el entrenamiento de modelos de IA y la optimización de algoritmos para reducir el consumo energético son esenciales. Estudios recientes han demostrado que la huella de carbono de los sistemas de IA puede ser significativa, lo que subraya la necesidad de estrategias efectivas para su mitigación.

El desarrollo responsable de la IA sostenible también depende de la existencia de marcos regulatorios y éticos robustos. Estos marcos deben garantizar que las tecnologías de IA se desarrollen y utilicen de manera que respeten los derechos humanos, promuevan la equidad y minimicen los impactos ambientales negativos. La investigación destaca la importancia de la colaboración internacional para establecer normativas coherentes y efectivas.

La medición precisa y la reducción de la huella de carbono de los sistemas de IA son aspectos críticos para la sostenibilidad. La implementación de métricas estandarizadas y la adopción de mejores prácticas, como la optimización de la eficiencia energética y el uso de infraestructuras verdes, son pasos fundamentales. La investigación sugiere que la industria tecnológica debe adoptar un enfoque proactivo en la gestión de su impacto ambiental, siguiendo ejemplos exitosos de empresas que ya están liderando en este ámbito.

Teóricamente, este estudio contribuye al desarrollo de un nuevo paradigma en el diseño de sistemas de IA que integran consideraciones de sostenibilidad. Metodológicamente, propone un enfoque multidisciplinario que puede servir como modelo para futuras investigaciones. Prácticamente, ofrece recomendaciones concretas para empresas y responsables políticos, destacando la necesidad de políticas que fomenten la innovación responsable y sostenible en IA.

A pesar de sus contribuciones, la investigación reconoce ciertas limitaciones, como la rápida evolución de la tecnología de IA y las diferencias en regulaciones y prácticas a nivel global. Estas limitaciones sugieren la necesidad de investigaciones continuas y actualizadas. Futuros estudios podrían enfocarse en sectores específicos, explorar los impactos a largo plazo de la IA sostenible y profundizar en las implicaciones éticas y sociales.

En resumen, la investigación sobre "Inteligencia Artificial Sostenible: Orígenes y Evolución" subraya la importancia de un enfoque integral para el desarrollo y la implementación de tecnologías de IA que sean beneficiosas tanto para la humanidad como para el medio ambiente. Al abordar aspectos técnicos, éticos, sociales y ambientales, este estudio proporciona un marco valioso que puede guiar el desarrollo futuro de la IA de manera sostenible y responsable.

La implementación de IA sostenible tiene el potencial de contribuir significativamente a la economía global, con estimaciones que sugieren un impacto de hasta $15.7 billones para 2030. Sin embargo, este crecimiento debe gestionarse de manera sostenible para evitar exacerbar los problemas ambientales existentes. La adopción de prácticas de IA sostenible podría llevar a reducciones significativas en las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la eficiencia energética en diversos sectores y acelerar el progreso hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU.

En última instancia, el éxito de la IA sostenible dependerá de la colaboración entre gobiernos, industria, academia y sociedad civil. Solo a través de un esfuerzo concertado y global podremos aprovechar el potencial transformador de la IA para crear un futuro más sostenible y equitativo para todos.

**Referencias Bibliográficas**

Binns, R. (2018). Fairness in machine learning: Lessons from political philosophy. *Proceedings of the 2018 Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*. https://dl.acm.org/doi/10.1145/3287560.3287596

Brundage, M., Avin, S., Clark, J., Toner, H., Eckersley, P., Garfinkel, B., ... & Amodei, D. (2018). The Malicious Use of Artificial Intelligence: Forecasting, Prevention, and Mitigation. <https://arxiv.org/abs/1802.07228>

Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies. *W. W. Norton & Company*.

Cath, C. (2018). Governing artificial intelligence: Ethical, legal and technical opportunities and challenges. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 376(2133), 20180080.

Cath, C., Wachter, S., Mittelstadt, B., Taddeo, M., & Floridi, L. (2018). Artificial Intelligence and the 'Good Society': The US, EU, and UK Approach. *Science and Engineering Ethics, 24*(2), 505-528.

CEMEX. (2020). CEMEX Go: Transforming the Construction Industry with AI. *CEMEX*. <https://www.cemex.com>

CIECEM. (2024). Explorando el Impacto de la IA en la Innovación y Sostenibilidad Empresarial. [https://ciecem.org/ponencia/explorando-el-impacto-de-la-ia-en-la-innovacion-y-sostenibilidad-empresarial/](https://ciecem.org/ponencia/explorando-el-impacto-de-la-ia-en-la-innovacion-y-sostenibilidad-empresarial/)

Comisión Europea. (2021). Proposal for a Regulation laying down harmonised rules on artificial intelligence. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/proposal-regulation-laying-down-harmonised-rules-artificial-intelligence>

Comisión Europea. (2021). Proposal for a Regulation laying down harmonised rules on artificial intelligence. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/proposal-regulation-laying-down-harmonised-rules-artificial-intelligence>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). Innovación Tecnológica en la Gestión del Agua. *CONAGUA*. https://www.gob.mx/conagua

Cowls, J., Tsamados, A., Taddeo, M., & Floridi, L. (2021). A definition, benchmark and database of AI for social good initiatives. Nature Machine Intelligence, 3(2), 111-115. <https://doi.org/10.1038/s42256-021-00296-0>

DASCi. (2024). La IA como facilitador de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. [https://dasci.es/ia4ods/inicio.html](https://dasci.es/ia4ods/inicio.html)

Data Innovation. (2024). Estrategias para Implementar la IA en el Crecimiento Sostenible del Negocio. [https://datainnovation.io/estrategias-para-implementar-la-ia-en-el-crecimiento-sostenible-del-negocio/](https://datainnovation.io/estrategias-para-implementar-la-ia-en-el-crecimiento-sostenible-del-negocio/)

Dignum, V. (2019). Responsible Artificial Intelligence: How to Develop and Use AI in a Responsible Way. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30371-6>

Elkington, J. (1998). Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. *New Society Publishers*.

Enel. (2019). Smart Grids: The Digital Revolution in Electricity Distribution. *Enel Distribución Chile*. https://www.enel.cl/en.html

European Commission. (2021). Proposal for a Regulation laying down harmonised rules on artificial intelligence. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/proposal-regulation-laying-down-harmonised-rules-artificial-intelligence>

Evans, R., & Gao, J. (2016). DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40%. *DeepMind Blog*. https://deepmind.com/blog/article/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-40

Floridi, L., Cowls, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V., ... & Vayena, E. (2018). AI4People—An ethical framework for a good AI society: Opportunities, risks, principles, and recommendations. *Minds and Machines, 28*(4), 689-707.

Floridi, L., Cowls, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V., ... & Vayena, E. (2018). AI4People—An ethical framework for a good AI society: Opportunities, risks, principles, and recommendations. *Minds and Machines, 28*(4), 689-707.

Fundación SERES. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible, Inteligencia Artificial y Big Data. [https://www.fundacionseres.org/Paginas/Campus/BuenasPracticas.aspx?IDe=161](https://www.fundacionseres.org/Paginas/Campus/BuenasPracticas.aspx?IDe=161)

Gebru, T., Morgenstern, J., Vecchione, B., Vaughan, J. W., Wallach, H., Daumé III, H., & Crawford, K. (2021). Datasheets for datasets. Communications of the ACM, 64(12), 86-92. <https://doi.org/10.1145/3458723>

Google. (2020). Our third decade of climate action: Realizing a carbon-free future. <https://blog.google/outreach-initiatives/sustainability/our-third-decade-climate-action-realizing-carbon-free-future/>

Gupta, A., Lanteigne, C., & Kingsley, S. (2020). SECure: A Social and Environmental Certificate for AI Systems. arXiv preprint arXiv:2006.06217. <https://arxiv.org/abs/2006.06217>

Gupta, S., Pinto, T., Bauer, D., Patel, J., & Agarwal, Y. (2021). CarbonTracker: Tracking and Predicting the Carbon Footprint of Training Deep Learning Models. arXiv:2104.10470 [cs]. <http://arxiv.org/abs/2104.10470>

Henderson, P., Hu, J., Romoff, J., Brunskill, E., Jurafsky, D., & Pineau, J. (2020). Towards the systematic reporting of the energy and carbon footprints of machine learning. Journal of Machine Learning Research, 21(248), 1-43. <https://www.jmlr.org/papers/volume21/20-312/20-312.pdf>

HPE. (2024). Crea una estrategia de IA más sostenible. [https://www.hpe.com/psnow/doc/a50010292ese](https://www.hpe.com/psnow/doc/a50010292ese)

IBM. (2020). Watson Decision Platform for Agriculture. *IBM*. https://www.ibm.com/products/watson-decision-platform-for-agriculture

Imazon. (2020). Sistema de Alerta de Desmatamento (SAD). *Imazon*. <https://imazon.org.br>

Jobin, A., Ienca, M., & Vayena, E. (2019). The global landscape of AI ethics guidelines. Nature Machine Intelligence, 1(9), 389-399.

Microsoft. (2021). AI for Earth. <https://www.microsoft.com/en-us/ai/ai-for-earth>

OCDE. (2019). Recommendation of the Council on Artificial Intelligence. <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0449>

O'Neil, C. (2016). Weapons of Math Destruction: How Big Data Increases Inequality and Threatens Democracy. *Crown Publishing Group*.

PwC. (2017). Sizing the prize: What's the real value of AI for your business and how can you capitalise? <https://www.pwc.com/gx/en/issues/analytics/assets/pwc-ai-analysis-sizing-the-prize-report.pdf>

PwC. (2019). AI and the future of work: Understanding automation's impact on the workforce. Recuperado de https://www.pwc.com/gx/en/issues/data-and-analytics/publications/artificial-intelligence-study.html

Rainforest Connection. (2019). Real-Time Rainforest Protection. *Rainforest Connection*. <https://rfcx.org>

Recology. (2020). Recycling & Composting. *Recology*. https://www.recology.com/recology-san-francisco/

Rolnick, D., Donti, P. L., Kaack, L. H., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K., ... & Bengio, Y. (2019). Tackling climate change with machine learning. arXiv preprint arXiv:1906.05433. <https://arxiv.org/abs/1906.05433>

Russell, S. J., & Norvig, P. (2021). Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th ed.). Pearson.

Schmidt, M., & Weigt, H. (2013). A review of the European offshore wind energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32*, 531-541.

Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., & Etzioni, O. (2020). Green AI. Communications of the ACM, 63(12), 54–63. <https://doi.org/10.1145/3381831>

Silver, D., Huang, A., Maddison, C. J., Guez, A., Sifre, L., van den Driessche, G., Schrittwieser, J., Antonoglou, I., Panneershelvam, V., Lanctot, M., Dieleman, S., Grewe, D., Nham, J., Kalchbrenner, N., Sutskever, I., Lillicrap, T., Leach, M., Kavukcuoglu, K., Graepel, T., & Hassabis, D. (2016). Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. Nature, 529(7587), 484–489. <https://doi.org/10.1038/nature16961>

Sostenibilidad.com. (2021). La alianza entre Inteligencia Artificial y desarrollo sostenible. https://www.sostenibilidad.com/desarrollo-sostenible/la-alianza-entre-inteligencia-artificial-y-desarrollo-sostenible/

Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. arXiv:1906.02243 [cs]. <http://arxiv.org/abs/1906.02243>

Taddeo, M., & Floridi, L. (2018). Regulate artificial intelligence to avert cyber arms race. Nature, 556(7701), 296-298.

Techopedia. (2024). La IA en la estrategia de sostenibilidad: Google y ALERTCalifornia. [https://www.techopedia.com/es/ia-sostenibilidad-google](<https://www.techopedia.com/es/ia-sostenibilidad-google>)

TEPCO. (2019). AI Technology for Optimizing Power Grid Operations. *TEPCO*. <https://www.tepco.co.jp/en/>.

UIK. (2021). La sostenibilidad en la era de la Inteligencia Artificial. [https://www.uik.eus/es/curso/sostenibilidad-era-inteligencia-artificial](https://www.uik.eus/es/curso/sostenibilidad-era-inteligencia-artificial](https://www.uik.eus/es/curso/sostenibilidad-era-inteligencia-artificial%5D%28https%3A//www.uik.eus/es/curso/sostenibilidad-era-inteligencia-artificial)

UIT. (2021). AI for Good Global Summit. <https://aiforgood.itu.int/>

Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., Felländer, A., Langhans, S. D., Tegmark, M., & Fuso Nerini, F. (2020). The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. Nature Communications, 11(1), 233. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14108-y>

West, S. M., Whittaker, M., & Crawford, K. (2019). Discriminating Systems: Gender, Race, and Power in AI. *AI Now Institute*. <https://ainowinstitute.org/discriminatingsystems.html>

Wildlife Conservation Society (WCS). (2020). Using AI to Monitor Wildlife in Colombia. *WCS Colombia*. https://colombia.wcs.org

World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). Our Common Future. Oxford University Press.