

Artículo Científico

Adopción de tecnologías sostenibles en infraestructuras de tecnologías de la información

Adoption of sustainable technologies in Information technology infrastructures



Rodriguez-Vizuet, Jaime Darío ¹



<https://orcid.org/0000-0003-1397-718X>



jaime.rodriguez.vizuet@utelvt.edu.ec



Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador, Esmeraldas.



Viteri-Ojeda, Jimena Catalina ²



<https://orcid.org/0000-0001-7049-8981>



jcviteri@esPOCH.edu.ec



Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, Chimborazo.



Villa-Feijó, Amarilis Liseth ³



<https://orcid.org/0000-0002-7774-4505>



amalis90-10-05.vf@hotmail.com



Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador, Loja.

Autor de correspondencia ¹



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v2/n1/31>

Resumen: La creciente necesidad de reducir el impacto ambiental de las infraestructuras tecnológicas ha impulsado el análisis sistemático de la adopción de tecnologías sostenibles en tecnologías de la información (TI). Este estudio, basado en una revisión bibliográfica exploratoria de fuentes indexadas en Scopus y Web of Science entre 2013 y 2024, identifica dimensiones clave como la eficiencia energética en centros de datos, el uso de energías renovables, el diseño ecológico de hardware y la implementación de normativas ambientales. Entre los hallazgos más relevantes destacan los beneficios económicos y ambientales de prácticas como la virtualización, el uso de inteligencia artificial en la gestión térmica, la adopción de energías limpias y el ecodiseño. No obstante, persisten barreras técnicas, económicas y normativas, especialmente en países en desarrollo. El análisis muestra que la sostenibilidad en TI requiere no solo innovaciones tecnológicas, sino también reformas estructurales en modelos de gestión, regulaciones y cultura organizacional. Se concluye que una transición digital sostenible demanda esfuerzos coordinados entre gobiernos, empresas, academia y sociedad civil, orientados a integrar la sostenibilidad como principio transversal en el diseño y operación de infraestructuras digitales.

Palabras clave: sostenibilidad digital; infraestructuras de TI; eficiencia energética; tecnologías verdes; diseño ecológico.



Check for updates

Received: 27/Feb/2024
Accepted: 16/Mar/2024
Published: 24/Mar/2024

Cita: Rodriguez-Vizuet, J. D., Viteri-Ojeda, J. C., & Villa-Feijó, A. L. (2024). Adopción de tecnologías sostenibles en infraestructuras de tecnologías de la información. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 2(1), 55-67. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v2/n1/31>

Revista Científica Ciencia y Método (RCyM)
<https://revistacym.com>
revistacym@editorialgrupo-aea.com
info@editorialgrupo-aea.com

© 2024. Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional**.



Abstract:

The growing need to reduce the environmental impact of technological infrastructures has prompted the systematic analysis of the adoption of sustainable technologies in information technology (IT). This study, based on an exploratory literature review of sources indexed in Scopus and Web of Science between 2013 and 2024, identifies key dimensions such as energy efficiency in data centers, the use of renewable energies, the ecological design of hardware and the implementation of environmental regulations. Among the most relevant findings are the economic and environmental benefits of practices such as virtualization, the use of artificial intelligence in thermal management, the adoption of clean energy and eco-design. However, technical, economic and regulatory barriers persist, especially in developing countries. The analysis shows that sustainability in IT requires not only technological innovations, but also structural reforms in management models, regulations and organizational culture. It is concluded that a sustainable digital transition requires coordinated efforts between governments, businesses, academia and civil society, aimed at integrating sustainability as a cross-cutting principle in the design and operation of digital infrastructures.

Keywords: digital sustainability; IT infrastructures; energy efficiency; green technologies; ecological design.

1. Introducción

La creciente preocupación por el cambio climático, la escasez de recursos y el impacto ambiental de las actividades humanas ha llevado a una reconfiguración significativa de las prioridades en todos los sectores productivos, incluido el de las tecnologías de la información (TI). Las infraestructuras de TI, esenciales para el funcionamiento de sistemas empresariales, servicios gubernamentales y plataformas digitales, consumen cantidades sustanciales de energía y generan emisiones relevantes de gases de efecto invernadero (GEI) (Andrae & Edler, 2015). Ante este panorama, la adopción de tecnologías sostenibles en las infraestructuras de TI se ha convertido en un imperativo estratégico tanto desde una perspectiva medioambiental como económica. Sin embargo, a pesar del reconocimiento de su importancia, la implementación de estas tecnologías enfrenta diversos desafíos técnicos, financieros, culturales y regulatorios que dificultan su consolidación a gran escala.

Uno de los principales problemas radica en el alto consumo energético de los centros de datos y redes de telecomunicaciones, cuya demanda energética global se ha incrementado de forma significativa en la última década. Se estima que los centros de datos representaron aproximadamente el 1 % del consumo eléctrico mundial en 2022, y esta cifra podría duplicarse para 2030 si no se adoptan medidas de eficiencia energética (IEA, 2023). Asimismo, la producción, uso y disposición final de equipos de

TI conlleva una huella ecológica considerable, incluyendo el uso intensivo de materiales críticos y la generación de residuos electrónicos (e-waste), lo cual agrava el impacto ambiental del sector (Baldé et al., 2020).

Diversos factores han contribuido a la lenta adopción de tecnologías sostenibles en las infraestructuras de TI. En primer lugar, muchas organizaciones priorizan la eficiencia operativa y el rendimiento sobre la sostenibilidad, postergando inversiones que, aunque benéficas a largo plazo, pueden implicar mayores costos iniciales (Shehabi et al., 2016). En segundo lugar, existe una brecha de conocimiento en torno a las prácticas sostenibles disponibles y su aplicabilidad según el tipo de infraestructura, lo que limita la toma de decisiones informadas por parte de los responsables tecnológicos. En tercer lugar, los marcos regulatorios aún son insuficientes o inconsistentes en numerosos contextos geográficos, lo que genera incertidumbre sobre los beneficios reales o las exigencias normativas futuras relacionadas con la sostenibilidad en el ámbito digital (Loomba et al., 2023).

En este contexto, resulta fundamental analizar de forma crítica las estrategias, tecnologías y modelos de gestión que favorecen la sostenibilidad en las infraestructuras de TI, entendidas como los componentes físicos y lógicos que soportan el procesamiento, almacenamiento y transmisión de datos digitales. Las tecnologías sostenibles comprenden una amplia gama de soluciones como la virtualización, la computación en la nube verde, el uso de energías renovables, la gestión térmica eficiente en centros de datos, el diseño ecológico de hardware y la adopción de estándares de certificación ambiental, como ISO 14001 y Energy Star (Murugesan, 2008; Zhang & Liu, 2021).

La relevancia de abordar esta temática desde una perspectiva científica se justifica por la necesidad urgente de generar conocimiento sistemático que oriente las políticas públicas, la inversión empresarial y la formación de profesionales en torno a prácticas sostenibles. Además, la revisión del estado del arte permite identificar vacíos en la literatura, evidenciar buenas prácticas a nivel internacional y proponer líneas futuras de investigación e innovación tecnológica. Dada la transversalidad del tema, esta revisión resulta pertinente para investigadores, responsables de políticas tecnológicas, ingenieros de sistemas, diseñadores de infraestructura y demás actores involucrados en la transformación digital sostenible.

La viabilidad del estudio se sustenta en la abundancia de literatura científica actualizada y en la disponibilidad de datos e informes técnicos elaborados por organismos internacionales, empresas tecnológicas y universidades. Asimismo, el desarrollo de marcos teóricos y metodológicos en torno a la sostenibilidad digital facilita la estructuración del análisis desde una perspectiva integral. Este trabajo se apoya en fuentes indexadas en bases de datos reconocidas como Scopus y Web of Science, garantizando la validez y confiabilidad de la información utilizada.

El objetivo de este artículo de revisión bibliográfica es analizar de manera sistemática la adopción de tecnologías sostenibles en infraestructuras de tecnologías de la

información, identificando sus principales características, beneficios, barreras y factores de éxito. Para ello, se examinará la literatura científica más relevante publicada en la última década, con especial énfasis en estudios empíricos y revisiones sistemáticas que aborden experiencias internacionales en sostenibilidad digital. La finalidad última es aportar un panorama actualizado que contribuya a la comprensión del fenómeno y al diseño de estrategias efectivas de transición hacia infraestructuras TI más sostenibles.

2. Materiales y métodos

La presente investigación adopta un enfoque exploratorio de revisión bibliográfica, con el propósito de analizar el estado del arte sobre la adopción de tecnologías sostenibles en infraestructuras de tecnologías de la información. Este enfoque resulta pertinente debido a la naturaleza emergente del tema y a la necesidad de sistematizar el conocimiento existente a partir de fuentes académicas confiables y actualizadas. La revisión bibliográfica permite identificar conceptos clave, enfoques teóricos, tendencias, barreras, oportunidades y casos de aplicación documentados en la literatura científica internacional, contribuyendo así a construir una base sólida para investigaciones futuras y para la formulación de políticas o estrategias en el campo de las TI sostenibles.

El proceso metodológico consistió en la búsqueda, selección, análisis y síntesis de publicaciones científicas indexadas en bases de datos reconocidas como Scopus y Web of Science. Se establecieron criterios de inclusión que contemplaron artículos publicados entre 2013 y 2024, en idioma inglés o español, con revisión por pares, y que abordaran de manera explícita temas vinculados con sostenibilidad en infraestructuras de TI, tales como centros de datos verdes, eficiencia energética, virtualización, energías renovables aplicadas al sector digital, diseño ecológico de hardware y normativas ambientales aplicables al entorno tecnológico. Se excluyeron fuentes no académicas, documentos sin respaldo metodológico riguroso y publicaciones con enfoque únicamente comercial o anecdótico.

La búsqueda se realizó mediante combinaciones de palabras clave en inglés como *sustainable IT infrastructure*, *green data centers*, *energy-efficient computing*, *green technologies in IT*, entre otras, aplicando operadores booleanos para refinar los resultados. Posteriormente, se llevó a cabo una lectura crítica de los artículos seleccionados, evaluando su pertinencia, calidad metodológica, originalidad, actualidad y relevancia para los objetivos del estudio. Se priorizaron aquellos trabajos con enfoques empíricos, revisiones sistemáticas y marcos conceptuales robustos que permitieran comprender de manera integral el fenómeno estudiado.

Los datos extraídos fueron organizados temáticamente para facilitar su análisis comparativo, considerando aspectos como tipos de tecnologías sostenibles, factores de adopción, beneficios reportados, barreras identificadas, casos de implementación,

impacto ambiental, y recomendaciones para futuras investigaciones. A partir de esta estructuración, se elaboró una síntesis crítica que refleja las principales tendencias y vacíos existentes en la literatura, procurando mantener un equilibrio entre la amplitud y profundidad del análisis.

Finalmente, se respetaron los principios éticos de la investigación científica, garantizando la correcta citación de las fuentes utilizadas y evitando cualquier tipo de plagio o manipulación de la información. La elaboración de este artículo de revisión se desarrolló bajo los lineamientos formales de la normativa APA séptima edición, asegurando así la calidad académica y la trazabilidad de las referencias bibliográficas empleadas.

3. Resultados

3.1. Dimensiones clave en la adopción de tecnologías sostenibles en infraestructuras de TI

3.1.1. Eficiencia energética en centros de datos

La eficiencia energética en los centros de datos constituye una de las líneas de acción más críticas en la sostenibilidad de las infraestructuras de tecnologías de la información, debido a que estos espacios concentran una proporción significativa del consumo energético global del sector. Los centros de datos, especialmente los de tipo hiperescala, demandan energía continua tanto para la operación de equipos informáticos como para la climatización, iluminación y sistemas auxiliares. En este sentido, el indicador *Power Usage Effectiveness* (PUE) ha sido ampliamente utilizado para medir la proporción de energía total consumida frente a la energía utilizada específicamente por el equipo de TI. Aunque el valor ideal se aproxima a 1.0, numerosos centros de datos aún operan con valores superiores a 1.5, lo cual refleja una oportunidad de mejora sustancial (Masanet et al., 2020).

Las estrategias para mejorar la eficiencia energética incluyen la virtualización de servidores, que permite ejecutar múltiples entornos virtuales en un solo hardware físico, reduciendo la cantidad de dispositivos necesarios y su consumo energético asociado. A esta práctica se suman el uso de tecnologías de refrigeración líquida directa, la construcción de instalaciones en climas fríos para aprovechar el enfriamiento natural (*free cooling*), y la integración de sistemas de gestión energética basados en inteligencia artificial. Un caso ilustrativo es el de Google, que logró reducir en un 40 % el consumo energético destinado a refrigeración en sus centros de datos mediante el uso de redes neuronales profundas para predecir y optimizar las condiciones de operación térmica (Evans & Gao, 2019).

La investigación también muestra que la automatización del monitoreo energético y el diseño modular de los centros de datos permiten identificar ineficiencias operativas y ajustar dinámicamente la carga de trabajo entre servidores físicos, contribuyendo así

a la reducción de pérdidas energéticas (Dastjerdi et al., 2016). En conjunto, estas innovaciones no solo resultan beneficiosas desde el punto de vista ambiental, sino que generan retornos económicos sustantivos a mediano y largo plazo, alineando sostenibilidad y rentabilidad.

3.1.2. Uso de energías renovables en operaciones de TI

El despliegue de energías renovables en las operaciones de TI ha adquirido una importancia estratégica dentro de las iniciativas de descarbonización del sector tecnológico. La transición hacia una matriz energética limpia implica no solo reducir las emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero, sino también fortalecer la resiliencia energética de las organizaciones frente a la volatilidad de los mercados energéticos fósiles. Empresas como Amazon, Apple, Microsoft y Google han adoptado compromisos ambiciosos en esta dirección, liderando proyectos de inversión en plantas solares, eólicas e hidroeléctricas, así como contratos de compra de energía renovable a largo plazo (PPAs) que aseguran un suministro limpio y estable (Microsoft, 2021; IEA, 2022).

Sin embargo, el impacto de las energías renovables en infraestructuras TI no solo se limita a los grandes proveedores. Cada vez más pequeñas y medianas empresas están incorporando paneles solares en sus instalaciones locales o migrando a servicios de computación en la nube ofrecidos por proveedores con infraestructura verde certificada. Además, se ha observado un crecimiento en la utilización de micredes inteligentes, las cuales permiten combinar fuentes de generación distribuida, almacenamiento en baterías y gestión automatizada del consumo energético, contribuyendo a una mayor autonomía y sostenibilidad operativa (Ren et al., 2021).

No obstante, la implementación de energías renovables enfrenta limitaciones estructurales, como la disponibilidad geográfica de recursos naturales, la infraestructura de red para integrar la generación distribuida y las barreras regulatorias o financieras en contextos emergentes. A ello se suma el reto tecnológico de garantizar la estabilidad de la operación TI en entornos donde la intermitencia de la energía solar o eólica podría afectar la continuidad de los servicios digitales (Kooimey & Masanet, 2021). Por ello, se hace necesario complementar estas fuentes con tecnologías de almacenamiento energético avanzadas y mecanismos de redundancia que aseguren la confiabilidad de los sistemas críticos, en la figura 1 se comparan desde soluciones locales de bajo costo hasta contratos y proyectos a gran escala, cada enfoque responde a necesidades y capacidades distintas.

Figura 1

Estrategias de energía renovable para ti: entre inversión y complejidad



Nota: La sostenibilidad en TI depende del equilibrio entre inversión, impacto y complejidad (Autores, 2024).

3.1.3. Diseño ecológico y adquisición responsable de hardware

El diseño ecológico de hardware, o *green hardware design*, se fundamenta en principios de sostenibilidad ambiental aplicados a cada fase del ciclo de vida de los dispositivos tecnológicos. Esto incluye desde la selección de materiales no tóxicos y reciclables, hasta la mejora de la eficiencia energética en la operación, el diseño modular que permita reparaciones y actualizaciones, y la planificación de su disposición final mediante programas de recolección y reciclaje. Las certificaciones como EPEAT (Electronic Product Environmental Assessment Tool) y Energy Star han sido desarrolladas precisamente para evaluar y promover estos criterios entre fabricantes y consumidores (Huang et al., 2017).

Un problema crítico asociado al hardware en TI es el incremento sostenido del residuo electrónico (*e-waste*), que alcanzó 53.6 millones de toneladas métricas a nivel global en 2019, con previsiones de crecimiento constante (Baldé et al., 2020). Este tipo de residuo contiene metales pesados y sustancias peligrosas que generan impactos negativos en la salud humana y los ecosistemas si no se gestionan adecuadamente. La presión ambiental y social ha llevado a que empresas multinacionales como Dell, HP y Lenovo desarrollen políticas de economía circular, donde el hardware obsoleto es recuperado, reacondicionado y reintroducido en el mercado, extendiendo así su vida útil.

La adquisición responsable también implica criterios de trazabilidad y transparencia en la cadena de suministro. En este sentido, iniciativas como la Responsible Business Alliance (RBA) han establecido códigos de conducta que promueven la ética laboral,

el respeto a los derechos humanos y la minimización del impacto ambiental en la fabricación de componentes electrónicos. Instituciones públicas y privadas que integran estos principios en sus políticas de compras tecnológicas no solo fortalecen su compromiso ambiental, sino que también promueven un cambio estructural en la industria.

3.1.4. Implementación de normativas y certificaciones ambientales

La adopción de normativas y certificaciones ambientales representa un mecanismo esencial para institucionalizar la sostenibilidad en las operaciones TI, proporcionando marcos de referencia, indicadores y metodologías para evaluar y mejorar el desempeño ambiental de las infraestructuras tecnológicas. La norma ISO 14001 sobre sistemas de gestión ambiental es una de las más reconocidas a nivel mundial y establece requisitos para desarrollar políticas, procedimientos y objetivos ambientales medibles dentro de las organizaciones. Por su parte, la norma ISO 50001, orientada a la gestión de la energía, promueve la mejora continua del desempeño energético a través de sistemas de monitoreo y control (International Organization for Standardization [ISO], 2018).

En el contexto específico de los centros de datos, las certificaciones LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) y BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) permiten validar la eficiencia energética, el uso racional del agua, la calidad ambiental interior y la gestión de materiales en las instalaciones. Estas certificaciones se han convertido en un diferenciador competitivo para los proveedores de servicios de almacenamiento y procesamiento de datos, al tiempo que sirven como garantía de sostenibilidad para sus clientes.

La implementación de estas normativas también actúa como catalizador para la innovación interna, ya que obliga a las organizaciones a revisar procesos, capacitar personal y establecer mecanismos de mejora continua. Además, pueden ser un requisito en licitaciones públicas, contratos internacionales o alianzas estratégicas, lo que refuerza su valor tanto ambiental como comercial. El alineamiento con marcos regulatorios globales contribuye también a mejorar la transparencia organizacional, la rendición de cuentas y el acceso a financiamiento verde, fortaleciendo el ecosistema de sostenibilidad tecnológica a nivel global.

4. Discusión

La adopción de tecnologías sostenibles en infraestructuras de tecnologías de la información (TI) constituye un eje transformador dentro de los actuales debates sobre sostenibilidad digital y transición ecológica en la era de la información. El análisis de la literatura científica demuestra que esta adopción no puede entenderse como un fenómeno lineal ni homogéneo, sino como una articulación compleja entre innovación tecnológica, dinámicas organizacionales, condicionamientos económicos y

estructuras normativas. A pesar del creciente consenso en torno a la urgencia de reducir el impacto ambiental del ecosistema digital, persiste una brecha significativa entre el discurso institucional sobre sostenibilidad y la implementación real de prácticas sostenibles, especialmente en contextos donde las infraestructuras tecnológicas carecen de recursos o capacidades técnicas avanzadas.

En este sentido, el enfoque en la eficiencia energética de los centros de datos aparece como una prioridad ineludible. La literatura es clara en señalar que estos centros, responsables de almacenar, procesar y distribuir grandes volúmenes de datos, son también puntos críticos de consumo energético. Las estrategias de virtualización, el uso de inteligencia artificial para la gestión térmica y la migración a arquitecturas modulares se han consolidado como mejores prácticas para reducir el índice PUE y minimizar el consumo energético no esencial (Masanet et al., 2020). No obstante, se ha documentado que, a pesar del avance en los países industrializados, muchas infraestructuras en regiones en desarrollo operan con tecnologías obsoletas que incrementan el uso de energía y limitan la aplicación de estos avances (Loomba et al., 2023). Esta disparidad técnica pone en evidencia que la sostenibilidad en TI no puede dissociarse de políticas globales de cooperación tecnológica, financiamiento verde y mecanismos de transferencia de conocimientos.

Asimismo, el despliegue de fuentes renovables para alimentar las operaciones de TI representa un paso esencial hacia la neutralidad de carbono en el sector. La evidencia empírica indica que las empresas tecnológicas que adoptan energías limpias —ya sea mediante contratos de compra directa, inversiones en generación propia o integración a redes inteligentes— logran reducir de forma significativa sus emisiones operativas (Microsoft, 2021). Sin embargo, los beneficios de esta transición no son automáticos. La incorporación efectiva de renovables depende de condiciones estructurales como la infraestructura energética del país, la disponibilidad de almacenamiento y la estabilidad del suministro. Investigaciones recientes subrayan la necesidad de integrar estas tecnologías dentro de un modelo más amplio de eficiencia sistémica, en el cual las tecnologías de información interactúen de manera sinérgica con otros sectores como la construcción, el transporte y la industria manufacturera (Ren et al., 2021; IEA, 2022).

Por otra parte, el diseño ecológico y la adquisición responsable de hardware continúan siendo dimensiones subestimadas en los análisis de sostenibilidad tecnológica, a pesar de su profundo impacto ambiental. El modelo lineal de producción, consumo y descarte de equipos electrónicos ha demostrado ser insostenible tanto por la generación masiva de residuos electrónicos como por la presión extractiva sobre minerales críticos y tierras raras. Tal como lo evidencian Baldé et al. (2020), la generación de e-waste ha alcanzado cifras alarmantes, sin una infraestructura global suficiente para su recolección y tratamiento adecuado. Este panorama sugiere que la sostenibilidad en infraestructuras TI debe incorporar una lógica de economía circular, donde los dispositivos se diseñen no solo para funcionar con menor consumo, sino también para facilitar su reutilización, desmontaje y reciclaje.

Sin embargo, adoptar criterios de ecodiseño implica una transformación profunda de las cadenas de valor tecnológicas, incluyendo la reformulación de incentivos económicos, marcos regulatorios e incluso las percepciones de los consumidores sobre la innovación. A nivel organizacional, muchas empresas aún privilegian la renovación tecnológica acelerada como sinónimo de competitividad, perpetuando ciclos de consumo que ignoran los costos ambientales del hardware descartado prematuramente. En este contexto, el desarrollo de regulaciones que obliguen a los fabricantes a asumir responsabilidad extendida sobre el ciclo de vida de sus productos aparece como una medida estratégica para alinear intereses empresariales con los objetivos de sostenibilidad ambiental (Huang et al., 2017).

Por último, la implementación de normativas y certificaciones ambientales funciona como una herramienta estructurante que formaliza los compromisos sostenibles en el ámbito TI. La adopción de estándares internacionales como ISO 14001, ISO 50001 o las certificaciones LEED no solo facilita la evaluación objetiva del desempeño ambiental, sino que también introduce una lógica de mejora continua y transparencia institucional (ISO, 2018). Sin embargo, varios estudios advierten sobre el riesgo de que estas certificaciones sean utilizadas como mecanismos simbólicos de legitimación sin que exista un cambio real en las prácticas internas. Para evitar esta superficialidad, es necesario fortalecer los procesos de auditoría independiente, así como fomentar una cultura organizacional orientada a la sostenibilidad como valor transversal y no como requisito externo impuesto por el mercado o los entes reguladores (Loomba et al., 2023).

Cabe destacar que la sostenibilidad en TI no debe ser entendida como un fin en sí mismo, sino como un principio operativo que debe guiar todas las decisiones tecnológicas, desde la planificación de la infraestructura hasta la gestión del final de vida útil de los sistemas. La revisión realizada permite concluir que los avances logrados hasta la fecha son significativos, pero insuficientes frente a la magnitud de los desafíos ambientales globales. Se requiere, por tanto, una acción coordinada entre gobiernos, sector privado, academia y sociedad civil para redefinir los marcos normativos, los modelos de negocio y las lógicas de innovación bajo principios de justicia ambiental, equidad tecnológica y sostenibilidad intergeneracional.

En consecuencia, futuras líneas de investigación deberían orientarse al análisis de experiencias locales de implementación de tecnologías sostenibles en contextos de baja capacidad tecnológica, así como al estudio comparativo de políticas públicas exitosas que hayan logrado articular incentivos económicos, regulación ambiental y adopción tecnológica. Del mismo modo, resulta necesario ampliar los enfoques interdisciplinarios que integren no solo la ingeniería y las ciencias ambientales, sino también la sociología, la economía política y los estudios organizacionales, para abordar la sostenibilidad digital como un proceso sistémico, dinámico y profundamente contextual.

5. Conclusiones

La revisión realizada permite concluir que la adopción de tecnologías sostenibles en infraestructuras de tecnologías de la información representa una necesidad ineludible para mitigar los impactos ambientales del crecimiento digital global. Lejos de ser una tendencia pasajera, la sostenibilidad tecnológica se configura como un componente estructural para la planificación, diseño, operación y renovación de los sistemas informáticos contemporáneos. Sin embargo, su implementación efectiva requiere no solo del desarrollo y acceso a soluciones técnicas avanzadas, sino también de transformaciones institucionales, normativas y culturales que posibiliten su adopción de manera sistémica y equitativa.

Entre las principales dimensiones identificadas, la eficiencia energética en centros de datos destaca como un área de intervención inmediata con beneficios ambientales y económicos demostrados. Las prácticas de virtualización, optimización térmica y automatización permiten mejorar significativamente el rendimiento energético de estas infraestructuras. Asimismo, la incorporación de energías renovables en las operaciones TI refuerza los compromisos de descarbonización, aunque enfrenta desafíos asociados a la disponibilidad tecnológica, las condiciones de red eléctrica y los marcos regulatorios locales.

El diseño ecológico y la adquisición responsable de hardware emergen como componentes críticos para avanzar hacia una economía circular en el sector tecnológico, donde se minimicen los residuos electrónicos y se promueva la prolongación del ciclo de vida de los dispositivos. La implementación de normas y certificaciones ambientales, por su parte, actúa como un mecanismo clave para institucionalizar la sostenibilidad en el ámbito digital, siempre que vayan acompañadas de procesos internos sólidos, auditorías independientes y una cultura organizacional comprometida.

En conjunto, los hallazgos de esta revisión ponen de relieve que la sostenibilidad en infraestructuras de TI no puede ser concebida como un conjunto de acciones aisladas o accesorias, sino como una lógica transversal que debe integrarse desde las fases iniciales del desarrollo tecnológico. Se hace evidente, además, la necesidad de una acción coordinada entre el sector privado, los gobiernos, la academia y la sociedad civil para impulsar la innovación verde, facilitar la transferencia de tecnología, fortalecer las capacidades locales y garantizar una transición digital ambientalmente justa.

Finalmente, se identifican importantes vacíos de conocimiento y oportunidades de investigación, especialmente en contextos geográficos del sur global, donde las condiciones económicas, políticas y técnicas requieren enfoques adaptativos. Promover estudios empíricos comparativos, integrar enfoques interdisciplinarios y generar modelos de gestión sostenible ajustados a diferentes escalas y realidades institucionales serán pasos fundamentales para avanzar hacia un ecosistema tecnológico verdaderamente sostenible, resiliente e inclusivo.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

Referencias Bibliográficas

- Andrae, A. S. G., & Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges*, 6(1), 117–157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>
- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU), and International Solid Waste Association (ISWA).
- Boné-Andrade, M. F. (2023). Inclusión Digital y Acceso a Tecnologías de la Información en Zonas Rurales de Ecuador. *Revista Científica Zambos*, 2(2), 1-16. <https://doi.org/10.69484/rcz/v2/n2/40>
- Dastjerdi, A. V., Gupta, H., Calheiros, R. N., Ghosh, S. K., & Buyya, R. (2016). Fog computing: Principles, architectures, and applications. In *Internet of Things: Principles and Paradigms* (pp. 61–75). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805395-9.00004-6>
- Erazo-Luzuriaga, A. F., Ramos-Secaira, F. M., Galarza-Sánchez, P. C., & Boné-Andrade, M. F. (2023). La inteligencia artificial aplicada a la optimización de programas informáticos. *Journal of Economic and Social Science Research*, 3(1), 48–63. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v3/n1/61>
- Evans, R., & Gao, J. (2019). DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40%. *Nature Machine Intelligence*, 1(9), 398.
- Galarza-Sánchez, P. C. (2023). Adopción de Tecnologías de la Información en las PYMEs Ecuatorianas: Factores y Desafíos. *Revista Científica Zambos*, 2(1), 21-40. <https://doi.org/10.69484/rcz/v2/n1/36>
- Galarza-Sánchez, P. C., Agualongo-Yazuma, J. C., & Jumbo-Martínez, M. N. (2022). Innovación tecnológica en la industria de restaurantes del Cantón Pedro Vicente Maldonado. *Journal of Economic and Social Science Research*, 2(1), 31–43. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v2/n1/45>
- García-Peña, V. R. (2023). Desarrollo y Uso de Aplicaciones Móviles en el Contexto Ecuatoriano. *Revista Científica Zambos*, 2(3), 1-15. <https://doi.org/10.69484/rcz/v2/n3/46>
- Huang, C. J., Wu, S. Y., & Yu, M. M. (2017). Green product design and development: A case study on green sustainable notebooks. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1302–1311.
- International Energy Agency (IEA). (2022). *Data Centres and Data Transmission Networks*. <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>

- International Energy Agency (IEA). (2023). *Electricity 2023: Analysis and forecast to 2025*. <https://www.iea.org/reports/electricity-2023>
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 50001:2018 - Energy management systems — Requirements with guidance for use*. <https://www.iso.org/standard/69426.html>
- Koomey, J. G., & Masanet, E. (2021). Does not compute: Avoiding pitfalls in assessing the Internet's energy and carbon impacts. *Joule*, 5(3), 509–513.
- Loomba, R. S., Paudel, R., & Jain, A. (2023). Green IT and sustainability: Barriers and strategic approaches in developing economies. *Journal of Cleaner Production*, 397, 136699.
- Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481), 984–986. <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>
- Microsoft. (2021). *Microsoft Sustainability Report: Carbon negative by 2030*.
- Murugesan, S. (2008). Harnessing Green IT: Principles and Practices. *IT Professional*, 10(1), 24–33. <https://doi.org/10.1109/MITP.2008.10>
- Picoy-Gonzales, J. A., Huarcaya-Taype, R., Contreras-Canto, O. H., Omonte-Vilca, A., Contreras-De La Cruz, C., & Gaspar-Quispe, J. C. (2023). *Sabores Conectados: Transformando la Gastronomía a través de las Tecnologías de la Información y Comunicación*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.58>
- Picoy-Gonzales, J. A., Huarcaya-Taype, R., Contreras-Canto, O. H., & Omonte-Vilca, A. (2023). *Fortalecimiento Metodológico de la Seguridad Informática en Posgrados: Análisis y Estrategias de Mejora*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.56>
- Ramos-Secaira, F. M. (2023). Seguridad Cibernética en Empresas Ecuatorianas: Prácticas y Retos Actuales. *Revista Científica Zambos*, 2(3), 16-28. <https://doi.org/10.69484/rcz/v2/n3/47>
- Ren, J., Lu, Y., & Li, W. (2021). Integrated Energy System Planning and Operation: Towards Green and Sustainable Computing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111188.
- Robalino-Latorre, M. C., Ramirez-Klinger, W. N., Guadalupe-Copa, R. C., & Cuello-García, S. A. (2023). Aplicación del Método Montecarlo en flujo de potencias a través del Software Octave. *Journal of Economic and Social Science Research*, 3(1), 31–47. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v3/n1/60>
- Shehabi, A., Smith, S. J., Sartor, D. A., Brown, R. E., Herrlin, M. K., Koomey, J. G., ... & Lintner, W. (2016). *United States Data Center Energy Usage Report*. Lawrence Berkeley National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1372902>
- Zhang, Y., & Liu, Y. (2021). A review of green data center and virtualization technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110557.