

Impacto y huella ambiental de los centros de datos y proveedores de nube

Mayo de 2025

AUTORES



Francisco Javier Fabra Caro

Francisco José Serón Arbeloa

Universidad de Zaragoza

EDITA: ECODES

DISEÑO GRÁFICO: ECODES

FECHA: Mayo de 2025

Índice

Resumen ejecutivo	4
Executive summary	5
1. Introducción	6
1.1. Sobre este documento	6
1.2. Objetivos del informe.....	6
1.3. Alcance y metodología de revisión documental	7
2. Contexto	9
2.1. Definición de los conceptos principales de este informe	9
2.2. Evolución histórica y tendencias actuales en el sector	10
3. Impacto ambiental y social de los centros de datos	18
3.1. Consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero	18
3.2. Uso de recursos naturales (agua, materiales) y gestión de residuos	20
3.3. Huella hídrica y de carbono	22
3.4. Impacto en la sociedad.....	24
4. Huella y sostenibilidad en proveedores de nube	26
4.1. Estrategias y tecnologías para mejorar la eficiencia energética.....	26
4.2. Certificaciones y normativas ambientales aplicables	27
5. Casos de uso.....	29
5.1. Implementación de estrategias sostenibles en centros de datos	29
5.2. Iniciativas sostenibles en proveedores de nube.....	30
5.3. Impacto sectorial y benchmarking	31
6. Retos y oportunidades	33
6.1. Desafíos actuales en la gestión ambiental de centros de datos.....	33
6.2. Innovaciones tecnológicas y tendencias futuras en sostenibilidad.....	34
6.3. Políticas públicas y regulaciones emergentes	36
6.4. Iniciativas públicas y privadas para centros de datos sostenibles en España	37
7. Conclusiones	40
Glosario	42
Bibliografía.....	46

Resumen ejecutivo

El presente informe analiza detalladamente el impacto ambiental de los centros de datos y proveedores de servicios en la nube, enfocándose en el consumo energético, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el uso de recursos naturales, y la gestión de residuos electrónicos. Se identifica que estas infraestructuras, fundamentales para la economía digital, tienen un significativo consumo energético y hídrico, generando presiones ambientales importantes. La demanda energética global de estos centros se ha incrementado notablemente en las últimas décadas, representando actualmente entre el 1% y 1,5% del consumo eléctrico mundial, con previsiones de aumento significativo en los próximos años, especialmente en España.

Las tendencias actuales apuntan hacia una optimización constante de la eficiencia energética mediante algoritmos avanzados, tecnologías de virtualización y refrigeración innovadoras, así como la integración creciente de energías renovables. Se destaca la importancia estratégica de la ubicación geográfica para reducir tanto la huella hídrica como la de carbono, habilitando lugares con condiciones climáticas favorables y acceso a fuentes renovables.

Los proveedores líderes en servicios de nube como AWS, Microsoft Azure y Google Cloud han adoptado ambiciosos compromisos ambientales, incluyendo alcanzar la neutralidad de carbono mediante inversiones significativas en energías renovables y técnicas avanzadas de gestión energética. Sin embargo, el informe también señala retos críticos como la alta generación de residuos electrónicos, la presión sobre recursos hídricos en áreas estresadas y la necesidad urgente de mejorar la transparencia en la cadena de suministro tecnológica.

En cuanto a iniciativas regulatorias y políticas públicas emergentes, se observa un fuerte impulso en Europa con el Pacto Verde Europeo y regulaciones específicas para centros de datos sostenibles, que han establecido marcos exigentes para la eficiencia energética, reporte ambiental y gestión de residuos electrónicos. En España, recientes iniciativas públicas y privadas, incluyendo importantes inversiones en Aragón por parte de AWS y Microsoft, posicionan al país como un referente europeo en sostenibilidad tecnológica.

Finalmente, el informe subraya que, pese a los desafíos actuales, existen importantes oportunidades derivadas de innovaciones tecnológicas como la inteligencia artificial, refrigeración líquida directa, economía circular y centros de datos submarinos. Estas innovaciones, combinadas con un marco regulatorio robusto y una mayor concienciación social y empresarial, pueden contribuir decisivamente a mitigar la huella ambiental del sector tecnológico global.

Executive summary

This report provides a detailed analysis of the environmental impact of data centers and cloud service providers, with a particular focus on energy consumption, greenhouse gas (GHG) emissions, the use of natural resources, and the management of electronic waste. These infrastructures, which are fundamental to the digital economy, are identified as having a significant energy and water footprint, thereby exerting considerable environmental pressure. The global energy demand of these facilities has increased substantially in recent decades, currently accounting for approximately 1% to 1.5% of global electricity consumption, with projections indicating further substantial growth in the coming years, especially in Spain.

Current trends highlight the ongoing optimization of energy efficiency through advanced algorithms, virtualization technologies, and innovative cooling systems, as well as the increasing integration of renewable energy sources. The strategic importance of geographic location is underscored as a key factor in reducing both water and carbon footprints, by enabling operations in areas with favorable climatic conditions and access to renewable energy.

Leading cloud service providers such as AWS, Microsoft Azure, and Google Cloud have adopted ambitious environmental commitments, including achieving carbon neutrality through significant investments in renewable energy and advanced energy management techniques. However, the report also identifies critical challenges, such as the high generation of electronic waste, pressure on water resources in stressed regions, and the urgent need to improve transparency across the technology supply chain.

Regarding regulatory initiatives and emerging public policies, a strong momentum is observed in Europe through the European Green Deal and specific regulations targeting sustainable data centers. These frameworks establish stringent requirements for energy efficiency, environmental reporting, and electronic waste management. In Spain, recent public and private initiatives—including major investments in Aragón by AWS and Microsoft—position the country as a European benchmark in technological sustainability.

Finally, the report emphasizes that, despite current challenges, significant opportunities exist through technological innovations such as artificial intelligence, direct liquid cooling, circular economy strategies, and underwater data centers. These innovations, when combined with robust regulatory frameworks and increased social and corporate awareness, can play a decisive role in mitigating the environmental footprint of the global technology sector.

1. Introducción

Esta primera sección presenta los objetivos del informe y presenta el alcance y metodología de revisión documental empleados para su elaboración durante el primer trimestre del año 2025.

1.1. Sobre este documento

Este informe está dirigido a responsables públicos, entidades reguladoras, profesionales del sector tecnológico, empresas proveedoras de servicios en la nube, organizaciones ambientales, investigadores y actores estratégicos interesados en comprender en profundidad el impacto ambiental asociado a las infraestructuras digitales. Su objetivo es ofrecer una visión rigurosa, basada en la evidencia, sobre los retos y oportunidades que plantea el desarrollo de centros de datos y servicios *cloud* desde una perspectiva de sostenibilidad.

De la misma forma, se pretende proporcionar un marco de análisis que contribuya a la toma de decisiones informadas, al diseño de políticas públicas y a la adopción de prácticas responsables por parte del sector privado y la sociedad civil.

A lo largo del presente informe, se han utilizado conceptos clave como huella de carbono, huella hídrica, eficiencia energética, sostenibilidad o impacto ambiental, entre otros, que aparecen reiteradamente en diferentes secciones y contextos. Esta repetición no obedece a una redundancia estilística, sino a la necesidad de abordar estos conceptos desde múltiples enfoques –tecnológico, ambiental, regulatorio y estratégico– que permitan comprender en su complejidad las implicaciones del funcionamiento de los centros de datos y servicios en la nube. Dado que el impacto ambiental de estas infraestructuras es un fenómeno sistémico, interrelacionado y en evolución constante, es esperable que algunos términos se empleen en distintos marcos analíticos o con matices diferentes según el aspecto tratado. Por ello, se invita al lector a realizar una lectura crítica e interpretativa, de modo que pueda construir una visión integrada y contextualizada en función de los objetivos y perspectivas de análisis que se proponga extraer del informe. En definitiva, se requiere un estudio atento y reflexivo para comprender plenamente la complejidad de los desafíos y oportunidades abordados.

Este documento va encaminado a conseguir los resultados del proyecto de investigación vinculado a la propuesta presentada por parte de la Fundación Ecología y Desarrollo en la Convocatoria de Subvenciones “Línea A” para el Desarrollo de Actividades de Interés General consideradas de Interés Social, en el Ámbito de la Investigación Científica y Técnica y Protección al Medio Ambiente en Materias de Competencia Estatal, publicada en el BOE no 209 de 29 de agosto de 2024 del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

1.2. Objetivos del informe

El presente informe tiene como objetivo analizar el impacto ambiental y la huella ecológica de los centros de datos y proveedores de servicios en la nube, poniendo especial énfasis en las estrategias de sostenibilidad. La relevancia del estudio se sustenta en el papel creciente que juegan estas infraestructuras tecnológicas en la economía digital, impulsando una demanda

exponencial de recursos energéticos, hídricos y materiales, con las consecuentes implicaciones medioambientales que ello conlleva.

De forma específica, los objetivos planteados para este estudio son los siguientes:

1. **Caracterizar y describir** detalladamente el impacto ambiental actual de los centros de datos y proveedores de servicios en la nube, centrándose en el consumo energético, emisiones de gases de efecto invernadero y uso de recursos naturales.
2. **Identificar y comparar** las prácticas más relevantes y eficaces para la reducción de la huella ecológica en centros de datos tradicionales frente a aquellas aplicadas en soluciones basadas en nube.
3. **Presentar ejemplos prácticos** documentados que ilustren la aplicación de estrategias de sostenibilidad en ambos modelos tecnológicos.
4. Analizar los **desafíos actuales** y las **oportunidades emergentes** en términos de tecnologías, políticas públicas e innovaciones para mejorar la sostenibilidad del sector.
5. Proponer **recomendaciones basadas en evidencias** publicadas que contribuyan a orientar futuras acciones, estrategias y políticas en materia de sostenibilidad medioambiental en centros de datos y soluciones basadas en la nube.

1.3. Alcance y metodología de revisión documental

Este informe se centra exclusivamente en la revisión documental y análisis crítico de información existente y publicada sobre el impacto ambiental de centros de datos tradicionales y servicios en la nube. Su alcance temporal considera principalmente información publicada en los últimos diez años, con énfasis en tendencias recientes, innovaciones y desarrollos tecnológicos y normativos. La delimitación geográfica del análisis comprende casos, estudios y publicaciones de ámbito global, incorporando ejemplos de diferentes regiones para garantizar un enfoque amplio y representativo de las prácticas actuales.

Es importante señalar que el informe no implica generación de datos experimentales nuevos ni desarrollo de análisis empíricos propios, sino una revisión exhaustiva y sistemática de fuentes existentes publicadas por entidades académicas, industriales, gubernamentales y organizaciones internacionales especializadas.

Para llevar a cabo la revisión documental, se aplicó un método sistemático estructurado en diversas etapas, siguiendo las pautas generalmente aceptadas para revisiones bibliográficas académicas. Esta metodología proporciona un marco riguroso, replicable y transparente, asegurando que las conclusiones presentadas se apoyan en evidencias científicas y técnicas de calidad, disponibles en publicaciones académicas y profesionales relevantes en el sector:

1. **Definición inicial de preguntas de investigación y palabras clave.** Se establecieron preguntas guía para delimitar el alcance temático, y se identificaron palabras clave tales como: “huella ecológica”, “impacto ambiental”, “eficiencia

energética”, “centros de datos”, “*cloud computing*”, “sostenibilidad ambiental”, o “huella de carbono”, entre otras.

2. **Búsqueda sistemática y recopilación de fuentes.** Se realizó una búsqueda exhaustiva utilizando bases de datos académicas, incluyendo IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, ACM Digital Library, Google Scholar, y bases de datos técnicas especializadas. Asimismo, se consultaron informes técnicos de instituciones relevantes como el **Uptime Institute**, la **Agencia Internacional de Energía (IEA)**, **Greenpeace**, y organismos internacionales y gubernamentales vinculados al ámbito tecnológico y ambiental.
3. **Criterios de selección y filtrado.** Los documentos recopilados se sometieron a criterios de inclusión y exclusión rigurosos, considerando principalmente su relevancia respecto a los objetivos planteados, actualidad de la información, autoridad de los autores y rigor metodológico empleado en cada fuente.
4. **Evaluación crítica de fuentes seleccionadas.** Tras la selección inicial, las fuentes se analizaron críticamente en términos de calidad metodológica, relevancia temática, aportaciones significativas y coherencia argumental. Este análisis permitió identificar consensos, discrepancias y vacíos existentes en la literatura revisada.
5. **Organización temática y síntesis integradora.** Finalmente, las fuentes seleccionadas se agruparon temáticamente según los apartados planteados en el índice del informe, realizando una síntesis integradora que permitiera extraer conclusiones sólidas y recomendaciones fundamentadas.

2. Contexto

Esta sección tiene como finalidad introducir y delimitar los principales conceptos técnicos y operativos que constituyen el objeto de estudio del informe. A través de una contextualización precisa del sector, se pretende establecer un marco teórico que permita comprender la naturaleza, evolución y funcionamiento de los centros de datos y de los servicios de computación en la nube, así como su papel estructural en la infraestructura digital global. Este análisis conceptual resulta imprescindible para interpretar adecuadamente las dinámicas de impacto ambiental asociadas a estas infraestructuras tecnológicas.

La computación en la nube y los centros de datos constituyen la base sobre la que se sustenta el procesamiento, almacenamiento y distribución de información en la economía digital contemporánea. No obstante, su crecimiento exponencial ha generado una atención creciente respecto a sus implicaciones medioambientales, particularmente en relación con el consumo energético, las emisiones de gases de efecto invernadero y el uso de recursos naturales. Para analizar estas cuestiones con rigor, es esencial establecer definiciones técnicas precisas que permitan una comparación homogénea y coherente de los modelos de infraestructura involucrados.

2.1. Definición de los conceptos principales de este informe

- **Centro de datos (Data Center).** Un centro de datos es una instalación física diseñada para alojar sistemas computacionales críticos y componentes asociados, tales como servidores, sistemas de almacenamiento de datos, equipos de redes, sistemas de refrigeración, infraestructura eléctrica redundante y dispositivos de seguridad. Su propósito principal es garantizar la disponibilidad continua de servicios digitales mediante una infraestructura que maximice la fiabilidad, escalabilidad y redundancia.

Desde un punto de vista técnico, los centros de datos se clasifican según distintos estándares, siendo el más reconocido el del **Uptime Institute**, que los categoriza en niveles (Tier I a Tier IV) en función de su nivel de tolerancia a fallos, redundancia y disponibilidad [1]. En términos de eficiencia energética, se utiliza comúnmente el indicador **PUE (Power Usage Effectiveness)**, que relaciona el consumo total de energía del centro con la energía utilizada exclusivamente en el procesamiento informático [2].

- **Proveedor de servicios en la nube (Cloud Service Provider, CSP).** Un proveedor de servicios en la nube es una entidad que ofrece servicios informáticos bajo demanda a través de Internet, utilizando una arquitectura distribuida y virtualizada. Los CSP proporcionan infraestructuras, plataformas y software como servicio (IaaS, PaaS, SaaS), eliminando la necesidad de que los usuarios mantengan recursos físicos propios. Entre los proveedores más destacados se encuentran Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure, Google Cloud Platform (GCP), IBM Cloud y Alibaba Cloud.

Los CSP operan grandes centros de datos distribuidos globalmente y aplican técnicas avanzadas de virtualización, orquestación de recursos, escalado automático y distribución geográfica para maximizar la eficiencia y resiliencia. La computación en la

nube permite compartir recursos físicos entre múltiples usuarios mediante arquitecturas *multitenant*, lo que puede reducir la huella ambiental per cápita mediante la optimización de cargas de trabajo y una gestión centralizada de la energía.

- **Huella ecológica y huella de carbono.** La huella ecológica se refiere al conjunto de impactos ambientales generados por una organización, producto o servicio en relación con el uso de recursos naturales, la generación de residuos y la alteración de ecosistemas. En el caso de los centros de datos y la nube, incluye indicadores como el consumo energético, la huella hídrica, la utilización de materias primas, y el tratamiento de residuos electrónicos.

Por su parte, la huella de carbono es una medida específica del total de emisiones de **gases de efecto invernadero (GEI)**, expresada comúnmente en toneladas equivalentes de dióxido de carbono (tCO₂e), generadas directa o indirectamente por una actividad. En el ámbito de las tecnologías digitales, esta métrica abarca tanto las emisiones directas (*Scope 1*), como las indirectas por consumo eléctrico (*Scope 2*) y otras emisiones indirectas asociadas a la cadena de suministro o el ciclo de vida de los equipos (*Scope 3*), siguiendo el marco del **Greenhouse Gas Protocol** [3].



- **Eficiencia energética y energías renovables en TIC.** La eficiencia energética en centros de datos y servicios *cloud* hace referencia a la capacidad de estos sistemas para realizar tareas computacionales minimizando el consumo de energía por unidad de procesamiento, almacenamiento o transmisión de datos. Se persigue reducir el consumo energético global mediante estrategias como la consolidación de servidores, el uso de algoritmos de gestión térmica, la mejora de sistemas de refrigeración, y la adopción de arquitecturas modulares o *edge computing*.

El uso de energías renovables en este contexto implica abastecer parcial o totalmente la demanda energética de centros de datos mediante fuentes no fósiles como solar, eólica, hidroeléctrica o biomasa, en un intento por reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar las emisiones de carbono. Algunos proveedores *cloud* líderes han adoptado compromisos públicos para alcanzar la neutralidad en carbono o incluso operar con un 100 % de energía renovable en sus operaciones globales [4,5].

2.2. Evolución histórica y tendencias actuales en el sector

La evolución histórica del sector de los centros de datos muestra una transformación desde instalaciones relativamente desconocidas hasta infraestructuras críticas que sustentan casi

todos los aspectos de la sociedad moderna. Inicialmente, los centros de datos servían principalmente para el procesamiento y almacenamiento de datos a gran escala. Sin embargo, el aumento exponencial en la demanda de creación, procesamiento y almacenamiento de datos impulsado por tecnologías como plataformas en línea, redes sociales, transmisión de video, infraestructura inteligente y conectada, vehículos autónomos e inteligencia artificial, ha llevado a un crecimiento significativo en las cargas de trabajo y las instancias de cómputo de los centros de datos [6,7].

Históricamente, la creciente demanda de energía de los centros de datos ha atraído la atención de investigadores y legisladores debido a la escala del uso de energía de la industria y sus implicaciones. En los Estados Unidos, por ejemplo, los centros de datos consumieron aproximadamente el 1.5% del consumo total de energía en 2006, cifra que aumentó a más del 1% del consumo energético mundial en 2011. Esta alta demanda energética ha llevado a una creciente preocupación por la huella de carbono de los centros de datos [8,9].

En cuanto a las tendencias actuales, se observa un fuerte enfoque en la sostenibilidad y la reducción del impacto ambiental [6-9]. Algunas de las tendencias más importantes incluyen:

- **Eficiencia energética.** Existe un esfuerzo continuo para optimizar el consumo de energía en todos los niveles de los centros de datos, desde los servidores y los sistemas de refrigeración hasta la infraestructura general.
- **Fuentes de energía renovable.** Cada vez más empresas están invirtiendo en energía solar y eólica, ya sea mediante la conexión directa a fuentes renovables o mediante la compra de certificados de energía renovable. Esta transición busca minimizar la huella de carbono y el consumo indirecto de agua asociado a la generación de electricidad.
- **Ubicación estratégica.** La ubicación geográfica se reconoce como un factor determinante importante de la huella de carbono y la huella hídrica de un centro de datos. La selección de lugares con temperaturas ambiente más bajas puede reducir las necesidades de refrigeración, disminuyendo así el consumo directo e indirecto de agua y las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la composición de las centrales eléctricas que suministran electricidad a un centro de datos juega un papel significativo en su impacto ambiental.
- **Optimización del almacenamiento de datos.** Se está prestando cada vez más atención a la gestión y optimización del almacenamiento de datos, incluyendo la identificación y eliminación de datos oscuros (datos no estructurados e inertes) y la migración de datos menos accesibles a sistemas de almacenamiento más eficientes energéticamente como las cintas magnéticas. Se estima que los datos oscuros representan una parte significativa del almacenamiento global y su almacenamiento requiere energía, contribuyendo a las emisiones de CO₂.
- **Consideraciones sobre el agua.** El consumo de agua, tanto directo para la refrigeración líquida como indirecto para la producción de electricidad, es una preocupación creciente. Se están explorando tecnologías de refrigeración alternativas y se está considerando la ubicación de los centros de datos en áreas con menor estrés hídrico para mitigar este impacto.

- **Conciencia del impacto material.** Se está reconociendo la materialidad de la "nube" y los impactos ecológicos más amplios de la computación y el almacenamiento de datos, incluyendo el consumo de recursos, la generación de calor, el ruido y los residuos electrónicos.
- **Migración a climas templados.** La creciente demanda de refrigeración de servidores está llevando a la migración de infraestructura de la nube a regiones con climas más templados, lo que permite utilizar la refrigeración natural y reducir la dependencia de equipos de refrigeración de alta potencia.



HUELLA AMBIENTAL DE LOS CENTROS DE DATOS

Los centros de datos son responsables de aproximadamente el 1.8% del consumo de electricidad en los Estados Unidos, contribuyendo a cerca del 0.5% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero del país [6]. A nivel global, el sector de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) representa el 10% del consumo energético mundial, comparable al consumo total de energía de países como Alemania y Japón [10]. La expansión de la computación en la nube ha intensificado este problema, con un aumento significativo en el consumo de energía y las emisiones de carbono [11,12].

La huella ambiental de los centros de datos es una preocupación creciente debido a su significativo consumo de energía y recursos, impulsado por la creciente demanda de creación, procesamiento y almacenamiento de datos. Inicialmente instalaciones relativamente desconocidas, los centros de datos se han convertido en infraestructuras críticas para la sociedad moderna.

Entre las preocupaciones ambientales generales, podemos sintetizar y destacar la siguientes:

- Existe un notable enfoque en las consecuencias ambientales de los centros de datos, particularmente en relación con su uso de energía y emisiones de carbono.

- La creciente **demanda de energía** de los centros de datos ha atraído la atención debido a la escala del uso de energía de la industria y sus implicaciones en las **emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)** y el **uso de agua**.
- Los centros de datos consumen agua directa e indirectamente y emiten GEI en su operación. La mayoría de sus demandas de energía son suministradas por la red eléctrica, que depende de centrales eléctricas que también consumen agua y emiten GEI.
- La ubicación geográfica y la combinación de fuentes de electricidad locales son factores importantes que determinan la huella de carbono de un centro de datos.

Respecto a la **huella de carbono**, las emisiones totales de carbono se pueden calcular multiplicando el consumo de energía por la intensidad de carbono de la fuente de energía [11]. Se ha estimado que, en 2020, el consumo de energía de almacenamiento de datos de los centros de datos en los Estados Unidos fue de 14 TWh, lo que resultó en casi 6.5 millones de toneladas métricas de emisiones de CO₂ [7].

Los **datos oscuros**, que representan una parte significativa del almacenamiento de datos mundial (estimado en un 54%), requieren energía para su almacenamiento y contribuyen a las emisiones de CO₂. Se estima que el almacenamiento de datos oscuros emite 5.8 MT de CO₂ [7]. Las emisiones totales de GEI atribuidas a los centros de datos en los Estados Unidos en 2018 fueron de 3.15×10^7 toneladas de CO₂-eq, casi el 0.5% del total de emisiones de GEI en los Estados Unidos [6]. Por tanto, podríamos decir que las emisiones de GEI durante la operación directa de los centros de datos no son despreciables. De hecho, son una fuente significativa de emisiones, sobre todo si se considera su crecimiento futuro y su potencial de optimización.

La adopción de energía renovable y las estrategias de optimización impulsadas por IA son fundamentales para alcanzar los objetivos de sostenibilidad y reducir la huella de carbono. Google Cloud, por ejemplo, tiene como objetivo operar con energía libre de carbono las 24 horas del día, los 7 días de la semana, para 2030, utilizando también tecnología de IA para mejorar las cargas de trabajo y los sistemas de refrigeración [11,5].

Por otra parte, el consumo hídrico en los centros de datos es considerable debido a la necesidad de refrigeración directa y al uso indirecto asociado a la generación eléctrica. En Estados Unidos, aproximadamente una quinta parte de los servidores de centros de datos presentan una huella hídrica directa en cuencas con estrés hídrico moderado a alto, reflejando la vulnerabilidad de estas infraestructuras ante la escasez de agua [6].

A nivel global, el **almacenamiento de datos** genera anualmente una huella hídrica de 41.65 gigalitros y una ocupación territorial de aproximadamente 59.45 kilómetros cuadrados [7]. En EE.UU., la huella hídrica operativa anual de los centros de datos alcanzó en 2018 los 5.13×10^8 m³, siendo alrededor del 75 % atribuible a dependencias indirectas derivadas de la generación de electricidad. Se estima que, en promedio, 1 MWh consumido por un centro de datos implica aproximadamente 7.1 m³ de agua, aunque esta cifra varía significativamente según la ubicación. De hecho, la selección estratégica del emplazamiento geográfico, especialmente en regiones con temperaturas más bajas, puede reducir considerablemente la necesidad de agua para enfriamiento.

El consumo hídrico directo anual de estos centros en Estados Unidos se estimó en 1.30×10^8 m³, situándolos entre los diez sectores industriales o comerciales con mayor demanda hídrica del país. Finalmente, la huella de escasez de agua (WSF) asociada a estas instalaciones fue de 1.29×10^9 m³ de consumo de agua equivalente, más del doble de la huella hídrica volumétrica, lo que indica una presión desproporcionada sobre cuencas hidrográficas con elevado estrés hídrico.

Además, existen otras huellas ambientales. Los centros de datos también tienen una huella de tierra debido a las instalaciones físicas y a la producción de energía (especialmente fuentes renovables como la hidroeléctrica y la bioenergía). También existe una preocupación por la huella material de la "nube", incluyendo el consumo de recursos, la generación de calor, el ruido y los residuos electrónicos.

En **España**, el sector de los centros de datos ha experimentado un crecimiento notable en las últimas décadas, impulsado por la digitalización y la creciente demanda de servicios en la nube. Inicialmente, estas infraestructuras se concentraban en áreas metropolitanas como Madrid y Barcelona. Sin embargo, en los últimos años, regiones como **Aragón** y **Andalucía** han emergido como polos atractivos para la expansión de centros de datos, debido a su acceso a fuentes de energía renovable como la solar y eólica, lo que permite reducir el impacto ambiental y operar con menores costes energéticos¹.

El crecimiento del sector en España también ha generado preocupaciones sobre su impacto ambiental. Se estima que los centros de datos en el país consumieron más de 6 TWh en 2024, con proyecciones que indican un aumento a 12 TWh en 2030 y hasta 26 TWh en 2050, a medida que se expanden las capacidades de procesamiento de datos y los servicios digitales². Este incremento en el consumo energético subraya la necesidad de implementar estrategias de eficiencia energética y adoptar fuentes de energía renovable para mitigar el impacto ambiental.



La inversión en infraestructuras de centros de datos en España ha sido significativa. Según proyecciones de la **Asociación Española de Data Centers (Spain DC³)**, se espera una inversión de 8.000 millones de euros en los próximos años, reflejando la creciente importancia del sector en la economía nacional⁴. Además, proyectos como el campus tecnológico en

¹ <https://www.greening-group.com/crecimiento-sostenible-de-los-data-centers-en-espana/>

² <https://www.energias-renovables.com/panorama/los-centros-de-datos-espaoles-consumiran-mas-20250109>

³ <https://spaindc.com/>

⁴ <https://www.muycanal.com/2025/02/18/centros-de-datos-espana>

Cantabria, con una inversión de 3.600 millones de euros, destacan el interés en desarrollar infraestructuras de gran escala fuera de las tradicionales áreas metropolitanas⁵.

En respuesta a las preocupaciones ambientales, se están adoptando diversas estrategias para mejorar la sostenibilidad de los centros de datos en España:

- **Eficiencia energética:** la implementación de tecnologías como la infraestructura hiperconvergente (HCI) ha demostrado reducir la demanda de energía en más del 27%, contribuyendo a operaciones más sostenibles⁶.
- **Uso de energías renovables:** la integración de fuentes de energía renovable en los centros de datos es una estrategia clave para reducir el impacto ambiental. Esto no solo disminuye el consumo de energía de fuentes no renovables, sino que también promueve un entorno de nube más ecológico y reciclable.
- **Ubicación estratégica:** la selección de emplazamientos en regiones con acceso a energías renovables y condiciones climáticas favorables contribuye a reducir las necesidades de refrigeración y el consumo energético general.

Estas iniciativas reflejan un compromiso creciente en España por desarrollar infraestructuras digitales que no solo satisfagan la demanda tecnológica, sino que también sean responsables con el medio ambiente y sostenibles a largo plazo.

INICIATIVAS DE SOSTENIBILIDAD

Las plataformas de computación en la nube y los centros de datos están implementando diversas iniciativas de sostenibilidad para abordar su significativo consumo de energía y su impacto ambiental. Estas iniciativas se centran en la reducción de emisiones de carbono, la mejora de la eficiencia energética, el uso de fuentes de energía renovable y la optimización de recursos.

Los principales proveedores de la nube, como **AWS**, **Azure** y **Google Cloud**, se han comprometido a aumentar significativamente su uso de energías renovables. AWS tiene el objetivo de alcanzar el 100% de uso de energía renovable para 2025. Microsoft Azure se esfuerza por lograr la negatividad en carbono para 2030, invirtiendo en **energías renovables** como la eólica, la solar y la hidroeléctrica. Google Cloud aspira a operar con energía libre de carbono las 24 horas del día, los 7 días de la semana, para 2030 [11]. Estos proveedores también están construyendo centros de datos alimentados por fuentes renovables [13].

Además, existe un esfuerzo continuo para optimizar el consumo de energía en todos los niveles de los centros de datos. Esto incluye la optimización del diseño de los centros de datos, la implementación de sistemas de refrigeración avanzados y eficientes, la reducción de la disipación de energía de la CPU y el uso de almacenamiento energéticamente eficiente. Métricas como el **Power Usage Effectiveness (PUE)**, el **Data Center Infrastructure Efficiency (DCiE)** y el **Carbon Usage Effectiveness (CUE)** se utilizan para medir y mejorar la eficiencia energética. Google afirma que sus centros de datos utilizan, en promedio, un 50%

⁵ <https://cadenaser.com/cantabria/2025/02/25/la-inversion-en-cantabria-nuevo-ejemplo-del-bum-de-los-centros-de-datos-radio-santander/>

⁶ <https://www.nutanix.com/es/blog/data-center-sustainability>

menos de energía que otros gracias a tecnologías como controles inteligentes de temperatura e iluminación y técnicas avanzadas de refrigeración [13].



Por otra parte, la **inteligencia artificial (IA)** desempeña un papel fundamental en los esfuerzos de sostenibilidad de los proveedores de la nube. Las soluciones de IA se utilizan para optimizar las operaciones de los centros de datos, disminuir el uso de energía y minimizar las emisiones de carbono. AWS utiliza la IA para mejorar las tasas de utilización de los servidores, predecir las necesidades de mantenimiento y adaptar dinámicamente el consumo de energía. Azure invierte significativamente en tecnología de IA para mejorar la eficiencia de los centros de datos y minimizar el desperdicio de energía. Google Cloud utiliza la IA para mejorar las cargas de trabajo y los sistemas de refrigeración. Sin embargo, es importante mantener un equilibrio, ya que los modelos de IA también pueden requerir importantes recursos de procesamiento para su funcionamiento [11].

Actualmente se están desarrollando nuevas arquitecturas de software y marcos de optimización para mejorar la eficiencia energética de los centros de datos. La virtualización de servidores también es una técnica clave en la computación en la nube verde, ya que permite enmascarar los recursos del servidor y consolidar múltiples servidores virtuales en menos servidores físicos. Esto conduce a una mayor utilización de los recursos y a la reducción de los costes de energía al apagar los servidores infrautilizados [13]. Las técnicas de tráfico también pueden reducir significativamente el consumo de energía en el procesamiento de datos multimedia [14].

Además, en lo relativo al diseño de centros de datos sostenibles, el diseño de los centros de datos considera la ubicación geográfica para aprovechar climas más fríos y reducir las necesidades de refrigeración. También se centra en la distribución eficiente de energía y el uso de sistemas de refrigeración innovadores. El **Massachusetts Green High Performance Computing Center (MGHPCC)** es un ejemplo de un centro de datos que utiliza un diseño ecológico y una ubicación favorable para lograr una operación energéticamente eficiente [13, 16].

La gestión de la demanda y provisionamiento dinámico también juegan un papel importante. El provisionamiento dinámico se refiere a la reducción del sobredimensionamiento de

infraestructura, donde los centros de datos mantienen servidores considerando la demanda actual, lo que resulta en un menor consumo de energía [13].

Además, existe una creciente conciencia del impacto ambiental del ciclo de vida completo de los equipos informáticos, incluyendo la fabricación, el uso y el desecho [15]. Algunas empresas, como Microsoft, tienen mecanismos para reciclar residuos electrónicos de los consumidores [13].

Por último, hay que destacar el rol de la transparencia. Grandes corporaciones como Google y Amazon publican informes que detallan los impactos ambientales generalizados de sus centros de datos, aunque la intensidad de carbono varía según la ubicación. Se aboga por una mayor transparencia sobre los impactos específicos de los centros de datos de **EO (Observación de la Tierra)** y por herramientas para medir el coste ambiental de la computación en la nube [15].

3. Impacto ambiental y social de los centros de datos

En esta sección vamos a analizar, de forma detallada y técnica, los principales vectores de impacto ambiental asociados al funcionamiento de los centros de datos. Estas infraestructuras, fundamentales para el procesamiento y almacenamiento de información digital a gran escala, requieren un consumo energético intensivo y una gestión compleja de recursos físicos y tecnológicos. Como consecuencia, su operación genera efectos significativos sobre el medio ambiente, tanto a nivel local como global.

Con el crecimiento exponencial del tráfico de datos, la proliferación de servicios digitales y la expansión de tecnologías emergentes como la **inteligencia artificial**, el **aprendizaje automático** y el **Internet de las Cosas (IoT)**, la presión medioambiental derivada del funcionamiento de los centros de datos ha adquirido una dimensión crítica. El consumo eléctrico, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el uso intensivo de agua para sistemas de refrigeración, y la generación de residuos electrónicos son algunos de los principales factores que configuran su huella ecológica.

En esta sección se abordarán estos aspectos desde una perspectiva cuantitativa y cualitativa, apoyándose en estudios técnicos, métricas estandarizadas y datos provenientes de organismos especializados. Así mismo, se examinarán los principales indicadores de eficiencia energética, como el *Power Usage Effectiveness* (PUE), y se discutirá su validez, limitaciones y tendencias de mejora. El análisis permitirá establecer una visión integral del impacto ambiental de los centros de datos y sentará las bases para la comparación posterior con los proveedores de servicios en la nube.

3.1. Consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero

El consumo energético de los centros de datos constituye uno de los principales vectores de impacto ambiental asociados a su funcionamiento. Estas infraestructuras concentran grandes cantidades de equipos informáticos de alta densidad (servidores, sistemas de almacenamiento, *switches*, *routers*, etc.) que operan de forma continua durante 24 horas al día, 365 días al año. Para garantizar su disponibilidad, rendimiento y fiabilidad, requieren un suministro eléctrico constante y sistemas de soporte auxiliares, tales como unidades de alimentación ininterrumpida (UPS), generadores de emergencia y sistemas de refrigeración activa. Esta demanda energética intensiva se traduce, en la mayoría de los casos, en un volumen significativo de emisiones indirectas de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente cuando la energía proviene de fuentes no renovables [17].

CONSUMO ENERGÉTICO GLOBAL

Según estimaciones recientes de la **Agencia Internacional de la Energía (IEA)**, los centros de datos representaron aproximadamente el 1–1,5 % del consumo eléctrico mundial en 2022

[18], cifra que, aunque relativamente estable en términos proporcionales gracias a mejoras en eficiencia, continúa creciendo en valores absolutos debido al aumento de la capacidad instalada. Factores como la expansión de servicios digitales, el auge de las arquitecturas distribuidas (*edge computing*), y el desarrollo de aplicaciones basadas en inteligencia artificial y *blockchain* han intensificado esta tendencia.

El consumo energético se distribuye entre tres componentes principales:

1. Energía para equipos de TI (*IT load*): servidores, dispositivos de red y almacenamiento.
2. Energía para sistemas de infraestructura (*non-IT load*): refrigeración, iluminación, distribución eléctrica, etc.
3. Pérdidas por conversión y redundancia: transformadores, rectificadores y sistemas de respaldo.

EMISIONES DE GEI

Las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del funcionamiento de los centros de datos pueden clasificarse según el marco del **Greenhouse Gas Protocol** [3] en:

- Alcance 1 (*Scope 1*): emisiones directas, por ejemplo, derivadas del uso de generadores diésel.
- Alcance 2 (*Scope 2*): emisiones indirectas asociadas al consumo eléctrico de la red.
- Alcance 3 (*Scope 3*): emisiones indirectas no controladas directamente, incluyendo las relacionadas con la fabricación de equipos, logística, mantenimiento, y final de vida útil de los dispositivos.

La mayoría de las emisiones se concentran en los alcances 2 y 3. La magnitud de estas emisiones depende en gran medida de la intensidad de carbono del mix energético de cada país o región, es decir, de la proporción de fuentes renovables frente a fuentes fósiles en la generación eléctrica.

INDICADORES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA: *POWER USAGE EFFECTIVENESS* (PUE)

El **Power Usage Effectiveness** (PUE) es el indicador estándar más utilizado para evaluar la eficiencia energética de un centro de datos. Fue introducido por el **Green Grid Consortium** [2] y se define como:

$$PUE = \frac{\text{Energía total consumida por el centro de datos}}{\text{Energía consumida por los equipos de TI}}$$

Un PUE ideal sería 1.0, lo que significaría que toda la energía suministrada se destina exclusivamente a los equipos informáticos, sin pérdidas asociadas a refrigeración, distribución o conversión. En la práctica, los valores típicos oscilan entre 1.2 y 2.5, aunque los centros de datos hiperescalares más avanzados pueden alcanzar valores cercanos a 1.1 o incluso inferiores [19].



El indicador PUE se ha adoptado ampliamente debido a su simplicidad y utilidad para evaluar mejoras internas o comparar instalaciones, aunque presenta importantes limitaciones. No considera el rendimiento de los equipos de TI, ni su nivel de utilización, por lo que un centro de datos con baja carga computacional puede presentar un buen PUE sin ser verdaderamente eficiente. Además, no ofrece información sobre el origen de la energía consumida ni sobre las emisiones de carbono asociadas, por lo que no puede utilizarse como métrica exclusiva de sostenibilidad [20]. Adicionalmente, el valor del PUE puede fluctuar estacionalmente o variar según las condiciones ambientales, dificultando su comparación entre distintas ubicaciones geográficas.

Sin embargo, el PUE tiene numerosos puntos fuertes: es una métrica sencilla de calcular y comunicar; permite realizar comparaciones internas y seguimiento de la evolución de la eficiencia energética; y fomenta la mejora de infraestructuras no TI, especialmente en refrigeración.

3.2. Uso de recursos naturales (agua, materiales) y gestión de residuos

Además del consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero, el funcionamiento de los centros de datos genera un impacto ambiental significativo derivado del uso intensivo de recursos naturales, en particular el agua y los materiales tecnológicos, así como de la generación de residuos, especialmente residuos electrónicos (**e-waste**). Este apartado examina dichos vectores de impacto desde una perspectiva técnica y documentada, considerando estudios recientes y métricas empleadas en el sector para su análisis.

Uno de los principales recursos naturales implicados en la operación de los centros de datos es el agua, utilizada fundamentalmente en los sistemas de refrigeración. En instalaciones de gran escala, el uso de refrigeración por evaporación o enfriamiento adiabático permite reducir el consumo energético, pero a costa de una elevada demanda de agua. Se estima que un centro de datos de hiperescala puede consumir entre 1 y 5 millones de litros de agua al día, dependiendo del tipo de tecnología de enfriamiento y de las condiciones climáticas locales [21]. Este uso intensivo de agua contribuye a la huella hídrica de las instalaciones, y puede generar conflictos en regiones con estrés hídrico, donde la competencia por el recurso es alta. En respuesta a esta problemática, se están desarrollando indicadores como el **Water Usage Effectiveness (WUE)**, definido por **The Green Grid** como la relación entre el volumen anual de agua utilizada para la refrigeración y el consumo energético de los equipos de TI, expresado en litros/kWh [22].

En cuanto al uso de materiales, la construcción y mantenimiento de centros de datos implica una importante demanda de recursos metálicos, minerales críticos y materiales compuestos utilizados en la fabricación de servidores, sistemas de almacenamiento, dispositivos de red y componentes electrónicos. Elementos como el litio, el cobalto, las tierras raras, el cobre o el aluminio son esenciales para estos equipos, muchos de los cuales provienen de cadenas de suministro globales con impactos ambientales y sociales asociados. Diversos estudios de **análisis del ciclo de vida (Life Cycle Assessment, LCA)** han evidenciado que el impacto ambiental de la fabricación de hardware puede superar, en ciertas etapas, al de su operación, especialmente cuando los equipos se renuevan con frecuencia [23].



La gestión de residuos constituye otro factor crítico. La rápida obsolescencia tecnológica y la continua renovación de equipos generan volúmenes crecientes de residuos electrónicos (*e-waste*), que contienen materiales tóxicos como plomo, mercurio, cadmio o bromo, además de metales valiosos que rara vez son recuperados en su totalidad. En 2020, el volumen global de residuos electrónicos superó los 53 millones de toneladas, y menos del 20 % se gestionó adecuadamente mediante

reciclaje formal o recuperación de materiales [24]. En el caso de los centros de datos, los residuos incluyen tanto dispositivos de TI como componentes de infraestructuras auxiliares (baterías, sistemas de climatización, cableado, etc.), muchos de los cuales tienen ciclos de vida cortos o están sujetos a protocolos de seguridad que dificultan su reutilización.

La creciente preocupación por estos impactos ha impulsado a algunos operadores a adoptar estrategias de economía circular, como la reutilización de equipos, la reparación y reacondicionamiento, el reciclaje selectivo y la selección de proveedores con certificaciones ambientales. Asimismo, iniciativas como la **Directiva Europea sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)** y programas voluntarios como el **EPEAT (Electronic Product Environmental Assessment Tool)** promueven prácticas más sostenibles en la gestión de materiales y residuos en entornos de alta densidad tecnológica [25].

3.3. Huella hídrica y de carbono

La evaluación de la huella ecológica de los centros de datos requiere el uso de métricas específicas que permitan cuantificar de manera estandarizada los impactos ambientales directos e indirectos derivados de su operación. Entre las más relevantes en el contexto actual se encuentran la huella hídrica y la huella de carbono, indicadores clave para evaluar la sostenibilidad de estas infraestructuras en relación con el consumo de recursos naturales y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

La huella hídrica de un centro de datos se refiere al volumen total de agua dulce utilizada directa o indirectamente en sus operaciones, incluyendo principalmente el agua consumida en los sistemas de refrigeración. Aunque algunas instalaciones utilizan sistemas de refrigeración por aire, una proporción significativa —especialmente en climas cálidos o en centros de datos de hiperescala— emplea tecnologías de refrigeración evaporativa, que implican un consumo considerable de agua. La métrica estandarizada para evaluar este aspecto es el **Water Usage Effectiveness (WUE)**, definida por **The Green Grid** como la cantidad de litros de agua consumidos al año por cada kilovatio-hora (kWh) entregado a los equipos de TI. Según los informes más recientes, los valores de WUE pueden oscilar entre 0,2 y 2,5 litros/kWh, dependiendo de la tecnología de enfriamiento, el diseño arquitectónico y la ubicación geográfica del centro de datos [22].

El impacto de esta huella hídrica no depende únicamente del volumen absoluto de agua utilizada, sino también del contexto hídrico local. Un centro de datos situado en una región con alta disponibilidad hídrica tendrá un impacto ambiental menor que uno con igual consumo en una zona con estrés hídrico. Por esta razón, la sostenibilidad hídrica debe evaluarse mediante indicadores que consideren tanto el uso absoluto como la vulnerabilidad del recurso, como propone el marco **AWARE (Available WATER REMaining)** [26].

En cuanto a la huella de carbono, esta representa la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero, expresada generalmente en toneladas equivalentes de dióxido de carbono (tCO₂e), generadas directa o indirectamente por las actividades del centro de datos. Esta métrica incorpora las emisiones de los tres alcances definidos por el **Greenhouse Gas Protocol**:

- *Scope 1*, que incluye las emisiones directas (por ejemplo, el uso de generadores diésel in situ).
- *Scope 2*, correspondientes al consumo de electricidad comprada.
- *Scope 3*, que abarca las emisiones indirectas del ciclo de vida (fabricación, transporte, eliminación de equipos, etc.).

Para evaluar el desempeño de los centros de datos en este ámbito, se ha propuesto la métrica **Carbon Usage Effectiveness (CUE)**, que relaciona las emisiones de CO₂ asociadas al consumo eléctrico con la carga de trabajo informática, expresada en kgCO₂/kWh [27]. Aunque menos generalizada que el PUE, la CUE proporciona una estimación directa de la huella de carbono operacional y se ve fuertemente influida por la intensidad de carbono del mix energético del proveedor. Un centro de datos que opere con energía 100 % renovable puede alcanzar un valor cercano a cero en CUE, mientras que aquellos alimentados con energía de origen fósil pueden tener valores significativamente mayores.

Algunos estudios sugieren que la combinación de métricas como PUE, WUE y CUE proporciona una visión más integral del rendimiento ambiental de un centro de datos, permitiendo identificar compensaciones y oportunidades de mejora. Por ejemplo, una reducción del consumo energético mediante refrigeración evaporativa puede disminuir el PUE, pero incrementar la WUE, generando un dilema ambiental que solo puede resolverse con un enfoque de análisis multicriterio o con herramientas de análisis del ciclo de vida (LCA) [28].

En este contexto, los centros de datos están implementando una variedad de estrategias para reducir su impacto ambiental, incluyendo el uso de energías renovables, tecnologías de recuperación de calor y sistemas de inteligencia artificial para optimizar la eficiencia energética y la gestión del agua. Estas iniciativas no solo disminuyen la huella de carbono y agua, sino que también promueven la sostenibilidad en el sector de los centros de datos.

USO DE ENERGÍA RENOVABLE

- La generación de energía renovable in situ, como la solar o eólica, puede reducir significativamente la huella de carbono y la escasez de agua, especialmente en áreas con altas emisiones de carbono basadas en la red [29,30].
- Los grandes proveedores de nube, como Google y Facebook, están comprometidos con la neutralidad de carbono mediante el aumento de la penetración de energías renovables y la mejora de la eficiencia energética [31].

RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL Y OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL AGUA

- La implementación de tecnologías de economización, como la economización de aire y agua, puede reducir la efectividad del uso de carbono y agua en un 11% y 22%, respectivamente [32].
- El uso de sistemas de refrigeración avanzados, como la distribución de aire bajo el suelo y los economizadores, puede optimizar los sistemas de ventilación y reducir la demanda energética hasta en un 25% [33].

INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y GESTIÓN TÉRMICA

- Herramientas como SHIELD y WaterWise utilizan algoritmos de aprendizaje automático para co-optimizar la huella de carbono y agua, mejorando la sostenibilidad de los centros de datos distribuidos geográficamente [34,35].
- El modelo GEECO ajusta dinámicamente la distribución de la carga de trabajo para equilibrar el rendimiento y reducir las emisiones de carbono [36].

3.4. Impacto en la sociedad

Además de sus repercusiones medioambientales, los centros de datos generan efectos relevantes en el ámbito social, que deben ser considerados en una evaluación integral de su huella global. Estos impactos sociales se manifiestan tanto en términos positivos —como la generación de empleo, el desarrollo económico local o la mejora de la infraestructura digital— como en aspectos potencialmente negativos, relacionados con desigualdades territoriales, presión sobre recursos locales y condiciones laborales en la cadena de suministro tecnológica.

En términos positivos, la construcción y operación de centros de datos puede contribuir de manera significativa al desarrollo económico local. Las grandes instalaciones requieren inversiones millonarias en infraestructuras físicas, redes eléctricas y conectividad, lo cual puede estimular el crecimiento en zonas geográficas menos industrializadas. Asimismo, generan empleo directo en actividades especializadas



como mantenimiento, seguridad, ingeniería o administración de sistemas, así como empleo indirecto en servicios logísticos, limpieza, hostelería y transporte. En muchos casos, estas inversiones están vinculadas a planes de digitalización nacional o regional que potencian el ecosistema tecnológico, educativo y empresarial local [37].

No obstante, el impacto social de los centros de datos no es uniformemente positivo y depende de factores como la escala de la instalación, el modelo de gobernanza, el entorno legal y la planificación territorial. En algunas regiones, la implantación de estos centros ha generado tensiones con comunidades locales, debido a la presión sobre infraestructuras básicas, el uso intensivo de recursos hídricos o el aumento del precio del suelo. La ubicación estratégica de centros de datos en zonas con energía barata o climas fríos (por motivos de eficiencia energética) puede dar lugar a fenómenos de concentración tecnológica que excluyen a otras regiones menos atractivas desde el punto de vista operacional, ampliando la brecha digital territorial [38].

Un aspecto especialmente relevante desde la perspectiva social es el que atañe a las condiciones laborales en la cadena de suministro de la industria tecnológica. La producción de hardware informático necesario para equipar los centros de datos depende de una cadena de suministro global, en la que intervienen procesos de extracción de minerales, fabricación de componentes electrónicos y ensamblaje final. Diversos informes han documentado casos de explotación laboral, condiciones de trabajo precarias e incluso trabajo infantil en la minería de minerales críticos como el cobalto o el coltán, utilizados en baterías, circuitos y componentes electrónicos [39]. Estos impactos no siempre son visibles en la fase operativa del centro de datos, pero forman parte inherente de su huella social a lo largo de todo su ciclo de vida.

Además, en el plano ético y de gobernanza, se plantea la cuestión de la gestión de datos personales y privacidad, especialmente en aquellos centros que almacenan o procesan grandes volúmenes de información sensible. La ubicación jurisdiccional de los centros, las políticas de acceso y los marcos normativos aplicables pueden influir significativamente en los derechos digitales de los ciudadanos, lo que ha llevado a la demanda de marcos legales más robustos, como el **Reglamento General de Protección de Datos (RGPD)** en la Unión Europea [40].

Por último, el papel de los centros de datos en la transición digital y la transformación social es innegable. Su existencia posibilita el funcionamiento de servicios esenciales como la educación en línea, la telemedicina, los sistemas de información geográfica, las plataformas de participación ciudadana y la inteligencia artificial aplicada a problemas sociales. Sin embargo, esta dependencia creciente también plantea riesgos de vulnerabilidad sistémica, en tanto que cualquier interrupción en estas infraestructuras podría tener efectos amplificados sobre la sociedad digitalizada.

La reciente orden ejecutiva **EO 14141**, firmada por el expresidente Joe Biden el 14 de enero de 2025, reconoce por primera vez el impacto negativo de los centros de datos en la salud pública⁷. Esta orden establece que la construcción de nuevos centros de datos debe evitar áreas con altos índices de contaminación del aire y riesgos elevados de cáncer, según los estándares de la Agencia de **Protección Ambiental (EPA)**. El crecimiento acelerado de la inteligencia artificial ha impulsado la expansión de estas infraestructuras, lo que ha generado preocupaciones sobre su consumo energético, uso de agua para refrigeración y generación de residuos electrónicos. Algunas investigaciones indican que la contaminación derivada de los centros de datos ha causado costes sanitarios significativos y muertes prematuras en Estados Unidos. La administración actual, bajo el presidente Donald Trump, aunque no ha revocado esta orden, ha enfatizado la necesidad de garantizar que estos centros operen con energía limpia producida en el país. Los expertos sugieren ubicar las tareas más intensivas en energía, como el entrenamiento de modelos de IA, en áreas menos pobladas para minimizar el impacto en la salud pública.

⁷ <https://elpais.com/tecnologia/2025-02-07/ee-uu-reconoce-que-los-centros-de-datos-son-perjudiciales-para-la-salud.html>

4. Huella y sostenibilidad en proveedores de nube

La sostenibilidad en los proveedores de servicios en la nube constituye un eje estratégico dentro del debate actual sobre el impacto ambiental de las infraestructuras digitales. Dado que estos proveedores operan centros de datos a gran escala, frecuentemente distribuidos globalmente y con cargas de trabajo altamente intensivas en cómputo, su consumo energético y sus emisiones asociadas de gases de efecto invernadero adquieren una dimensión crítica.

En este contexto, la optimización de la eficiencia energética, la transición hacia fuentes de energía renovable y la minimización de la huella de carbono se han consolidado como objetivos prioritarios para el diseño y operación de infraestructuras *cloud* sostenibles.

Esta sección examina las estrategias, tecnologías e indicadores adoptados por los principales actores del sector para reducir su impacto ambiental, así como las implicaciones normativas y de mercado que están configurando nuevas exigencias en materia de sostenibilidad digital.

4.1. Estrategias y tecnologías para mejorar la eficiencia energética

A continuación, se introducen las principales estrategias para mejorar la eficiencia energética:

- **Optimización de recursos y algoritmos de asignación.** La implementación de algoritmos de optimización de recursos y asignación consciente de energía es fundamental para mejorar la eficiencia energética en los centros de datos en la nube. Estos algoritmos ayudan a distribuir la carga de trabajo de manera eficiente, reduciendo el desperdicio de energía y promoviendo una infraestructura de computación más sostenible [41].
- **Integración de energías renovables.** La integración de fuentes de energía renovable en los centros de datos es una estrategia clave para reducir el impacto ambiental. Esto no solo disminuye el consumo de energía de fuentes no renovables, sino que también promueve un entorno de nube más ecológico y reciclable [42,43].
- **Uso de tecnologías avanzadas.** La virtualización de servidores, la automatización sin servidor (*serverless*) y la computación en el borde (*edge computing*) constituyen tecnologías clave para reducir significativamente el consumo de energía. La virtualización permite consolidar múltiples servidores físicos en pocos equipos virtuales, reduciendo la carga energética. Por su parte, la computación *serverless* ajusta dinámicamente los recursos computacionales según la demanda instantánea, evitando recursos inactivos, mientras que la computación en el borde disminuye la necesidad de extensas transferencias de datos, reduciendo adicionalmente el consumo energético global [44,45].

TECNOLOGÍAS EMERGENTES Y SU IMPACTO

- **Inteligencia artificial generativa.** La inteligencia artificial generativa mejora la toma de decisiones y la gestión de recursos, optimizando el uso de energía y apoyando los objetivos ambientales. Esta tecnología, junto con la automatización sin servidor, contribuye a la reducción de la huella de carbono [45].
- **Computación en el borde y redes definidas por software (SDN).** La computación en el borde reduce la carga en la infraestructura de red al procesar datos más cerca de la fuente, lo que disminuye el consumo de energía. Las SDN facilitan la interoperabilidad y el uso eficiente de la infraestructura de red, mejorando la sostenibilidad de los centros de datos [42,46].

4.2. Certificaciones y normativas ambientales aplicables

La sostenibilidad de los proveedores de servicios en la nube está regulada y orientada por un conjunto de certificaciones ambientales y normativas específicas que establecen estándares para la operación eficiente y responsable de los centros de datos. Estas certificaciones permiten evaluar objetivamente las prácticas ambientales de las empresas, incentivando la adopción de estrategias que reduzcan significativamente el impacto ambiental en términos energéticos, de emisiones y uso de recursos naturales.

Una de las certificaciones más extendidas y reconocidas a nivel global es la **ISO 14001**, que proporciona un marco normativo internacional para la implementación efectiva de sistemas de gestión ambiental (SGA) [47]. Esta certificación permite a los proveedores de nube establecer objetivos ambientales claros, realizar auditorías periódicas y monitorizar continuamente su desempeño ambiental, asegurando la mejora continua de sus operaciones.

Así mismo, en el ámbito específico de los centros de datos, destaca la certificación del **Uptime Institute**, en particular la iniciativa **Efficient IT Stamp of Approval** [48], que evalúa y reconoce la eficiencia energética y la sostenibilidad operacional mediante la revisión detallada de prácticas internas y tecnologías implementadas, incluyendo el uso de energías renovables, estrategias de refrigeración eficiente y optimización de recursos informáticos.

Otra normativa clave es el **Código de Conducta Europeo sobre la Eficiencia Energética en los Centros de Datos (EU Code of Conduct)**, desarrollado por el **Joint Research Centre** de la Comisión Europea [49]. Este código establece directrices específicas para mejorar la eficiencia energética y minimizar la huella de carbono en centros de datos europeos, alentando a los operadores a implementar mejores prácticas de gestión energética y tecnologías sostenibles.

La certificación **LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)**, promovida por el **US Green Building Council**, también juega un papel relevante al evaluar integralmente las instalaciones de centros de datos, no solo en términos de eficiencia energética, sino considerando aspectos como la selección de materiales sostenibles, la gestión eficiente del agua y la reducción de residuos [50]. Esta certificación es altamente valorada por los proveedores globales de nube debido a su prestigio y reconocimiento internacional.



De igual manera, el esquema **Energy Star for Data Centers**, impulsado por la **Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)**, proporciona indicadores estandarizados para evaluar la eficiencia energética, especialmente en servidores y equipos electrónicos utilizados en centros de datos. Este programa ofrece parámetros claros para optimizar la gestión energética y reducir el consumo total de energía, facilitando comparativas y benchmarking entre proveedores del sector [51].

Finalmente, algunas normativas y directivas europeas complementarias juegan un papel importante, como la **Directiva sobre Eficiencia Energética (2012/27/UE)** y la reciente **Directiva sobre Informes de Sostenibilidad Corporativa (CSRD, Corporate Sustainability Reporting Directive)**, que amplía las obligaciones de reporte sobre el **desempeño ambiental, social y de gobernanza (ASG)** de las empresas tecnológicas y centros de datos que operan en territorio europeo. Estas regulaciones aseguran mayor transparencia y promueven prácticas sostenibles mediante mecanismos regulatorios sólidos y efectivos [52].

5. Casos de uso

En esta sección se presenta un análisis detallado de diversos estudios de caso y ejemplos prácticos representativos sobre la implementación de estrategias y tecnologías orientadas a mejorar la sostenibilidad ambiental en centros de datos y proveedores de servicios en la nube. El objetivo es ilustrar, a través de experiencias reales documentadas, las iniciativas más destacadas y efectivas para reducir la huella ecológica y mitigar el impacto ambiental generado por estas infraestructuras digitales.

A partir de una selección de casos relevantes a nivel global, se examinarán tanto las soluciones tecnológicas adoptadas como las prácticas operativas y las políticas corporativas que han permitido obtener resultados tangibles en términos de eficiencia energética, reducción del consumo de recursos naturales y gestión sostenible de residuos y emisiones. Esta sección busca proporcionar evidencia concreta que sirva de referencia práctica para futuras estrategias sostenibles en el sector tecnológico.

5.1. Implementación de estrategias sostenibles en centros de datos

La creciente demanda de servicios digitales ha impulsado a los operadores de centros de datos a adoptar estrategias innovadoras que mejoren la eficiencia energética y reduzcan el impacto ambiental. A continuación, se presentan casos destacados que ilustran la aplicación efectiva de estas estrategias:

GOOGLE: INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA OPERATIVA⁸

Google ha sido pionero en la incorporación de energías renovables en sus operaciones. Desde 2017, la empresa ha igualado el 100% de su consumo eléctrico global con compras de energía renovable. Además, ha implementado tecnologías de inteligencia artificial para optimizar el consumo energético en sus centros de datos, logrando una reducción del 40% en el uso de energía para refrigeración. Estas iniciativas han posicionado a Google como líder en sostenibilidad dentro del sector tecnológico.

MICROSOFT: PROYECTO NATICK Y EXPLORACIÓN DE CENTROS DE DATOS SUBMARINOS⁹

Microsoft ha explorado soluciones innovadoras como el Proyecto Natick, que consistió en el despliegue de un centro de datos submarino frente a las costas de Escocia. Este proyecto demostró que los centros de datos sumergidos pueden ser más eficientes energéticamente y presentar menores tasas de fallos que los terrestres, aprovechando la temperatura del agua para la refrigeración y reduciendo la necesidad de sistemas de enfriamiento adicionales.

⁸ <https://www.integrityenergy.com/blog/future-proofing-data-centers-with-renewable-energy-solutions/>

⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Project_Natick

ENWAVE: SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON AGUA DE LAGO EN TORONTO¹⁰

Enwave, en colaboración con la ciudad de Toronto, implementó un sistema de refrigeración profunda con agua de lago (Deep Lake Water Cooling). Este sistema utiliza agua fría de las profundidades del Lago Ontario para enfriar edificios, incluyendo centros de datos, reduciendo el consumo energético en un 75% en comparación con sistemas de aire acondicionado tradicionales y eliminando aproximadamente 40.000 toneladas de CO₂ anuales.

DIGITAL REALTY: COMPROMISO CON LA ENERGÍA RENOVABLE Y EFICIENCIA¹¹

Digital Realty, un proveedor global de centros de datos, ha integrado energías renovables en sus operaciones, alcanzando 1 GW de proyectos eólicos y solares bajo contrato en varios estados de EE.UU. Además, ha implementado sistemas de eficiencia energética que han resultado en la reducción de 1.8 millones de toneladas métricas de CO₂ en 2022, equivalente al consumo eléctrico anual de aproximadamente 361.800 hogares en EE.UU.

SWITCH: USO DE ENERGÍA SOLAR Y DISEÑO EFICIENTE¹²

Switch ha desarrollado el campus de centros de datos Citadel en Nevada, diseñado para ser alimentado por energía solar. Este campus incorpora sistemas de almacenamiento de energía y tecnologías de refrigeración avanzadas, reduciendo significativamente su huella de carbono y estableciendo un modelo para futuros desarrollos sostenibles en la industria.

5.2. Iniciativas sostenibles en proveedores de nube

La sostenibilidad se ha convertido en un factor clave en las estrategias corporativas de los principales proveedores globales de servicios en la nube. Estas compañías han implementado iniciativas específicas destinadas a reducir su impacto ambiental mediante la integración de fuentes renovables, la optimización del consumo energético y la adopción de prácticas operativas más sostenibles.

AMAZON WEB SERVICES (AWS): COMPROMISO CLIMÁTICO Y ENERGÍAS RENOVABLES

AWS se ha comprometido públicamente a alcanzar un uso de energía 100% renovable para sus operaciones globales para 2025, adelantando su objetivo inicial previsto para 2030. Mediante acuerdos de compra de energía renovable (PPAs), AWS ha anunciado inversiones significativas en proyectos eólicos y solares a gran escala, convirtiéndose en uno de los mayores compradores corporativos de energía renovable a nivel mundial [53].

¹⁰ <https://en.wikipedia.org/wiki/Enwave>

¹¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_Realty

¹² https://en.wikipedia.org/wiki/Switch_company

GOOGLE CLOUD PLATFORM: OPERACIÓN CARBONO-NEUTRAL Y OPTIMIZACIÓN POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Google Cloud no solo ha igualado su consumo eléctrico anual con compras de energía renovable desde 2017, sino que además es pionera en la operación carbono-neutral y trabaja hacia la meta de operar únicamente con energía libre de carbono en todo momento antes de 2030. Google emplea inteligencia artificial para optimizar sus centros de datos, consiguiendo reducir significativamente el consumo energético para enfriamiento, en algunos casos hasta en un 40% [54].

MICROSOFT AZURE: CARBON NEGATIVE E INICIATIVAS INNOVADORAS

Microsoft ha anunciado planes para convertirse en carbono negativo hacia 2030, comprometiéndose a eliminar de la atmósfera más carbono del que emite. Como parte de su estrategia, Azure implementa continuamente soluciones innovadoras como centros de datos submarinos (Proyecto Natick) y tecnologías avanzadas de refrigeración que minimizan drásticamente su huella de carbono. Asimismo, Azure promueve iniciativas para reducir emisiones en toda su cadena de suministro y colabora en proyectos globales para desarrollar mercados más sostenibles [55].

IBM CLOUD: REDUCCIÓN DE EMISIONES Y GESTIÓN EFICIENTE DE ENERGÍA

IBM ha implementado un sistema integral de gestión energética que le ha permitido reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 39,7% desde 2005. Además, IBM Cloud está comprometida con alcanzar un 90% de energía renovable en sus operaciones globales hacia 2030. La compañía utiliza técnicas avanzadas de refrigeración líquida directa y estrategias de optimización energética mediante inteligencia artificial, contribuyendo significativamente a la reducción de su impacto ambiental [56].

ALIBABA CLOUD: EFICIENCIA ENERGÉTICA E INVERSIONES SOSTENIBLES

Alibaba Cloud ha desplegado múltiples iniciativas para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental de sus operaciones, incluyendo tecnologías avanzadas como la refrigeración líquida por inmersión y centros de datos modulares energéticamente eficientes. Además, Alibaba ha realizado importantes inversiones en energías renovables, anunciando el objetivo de operar centros de datos completamente neutros en carbono para 2030 [57].

5.3. Impacto sectorial y benchmarking

El impacto ambiental del sector de los centros de datos y proveedores de servicios en la nube se ha convertido en un tema prioritario dentro de la industria tecnológica, impulsando la creación de estándares, indicadores y metodologías de benchmarking que permiten evaluar y comparar objetivamente el desempeño ambiental de estas organizaciones. Dichas evaluaciones sectoriales facilitan a los operadores identificar oportunidades de mejora, implementar mejores prácticas y posicionarse competitivamente en el ámbito de la sostenibilidad.

Entre los esfuerzos más notables para medir y comparar el desempeño energético y ambiental de los centros de datos se encuentra el ***Uptime Institute Global Data Center Survey***, una encuesta anual que evalúa tendencias clave en eficiencia operativa, uso de energías renovables y estrategias de sostenibilidad [58]. Este estudio proporciona datos comparativos útiles para identificar las prácticas más efectivas y áreas críticas de mejora, además de resaltar las mejores prácticas en eficiencia energética y reducción de la huella de carbono.

Por otro lado, **Greenpeace** publica regularmente el **informe *Clicking Clean***, que califica a los proveedores globales de servicios en la nube según su compromiso ambiental, uso de energías renovables y transparencia en prácticas sostenibles [59]. Este informe ha influido notablemente en las decisiones estratégicas de los grandes operadores del sector, destacando la importancia de la transparencia y la rendición de cuentas en la sostenibilidad tecnológica.

Otra referencia destacada es el **informe anual *Carbon Clean 200***, desarrollado conjuntamente por **Corporate Knights** y **As You Sow**, que clasifica a las empresas tecnológicas y otros sectores según sus ingresos derivados de soluciones sostenibles [60]. Este benchmarking facilita que inversores, empresas y organismos regulatorios identifiquen a aquellas compañías con un desempeño ambiental sobresaliente, incluyendo proveedores clave de nube que lideran la transición energética hacia infraestructuras más sostenibles.

Finalmente, organizaciones como **CDP (Carbon Disclosure Project)** proporcionan una plataforma global de divulgación ambiental que evalúa la transparencia y desempeño climático de las empresas, incluidas muchas del sector tecnológico y *cloud*. El puntaje CDP es utilizado por inversores y clientes para evaluar y comparar la gestión ambiental de distintos proveedores, permitiendo una evaluación estandarizada y objetiva del sector [61].

6. Retos y oportunidades

La gestión ambiental de los centros de datos y proveedores de servicios en la nube plantea importantes retos derivados del crecimiento acelerado del sector, la intensificación del consumo energético y la presión sobre los recursos naturales. Sin embargo, esta situación también abre múltiples oportunidades vinculadas a la innovación tecnológica, la eficiencia operativa y la adopción de políticas sostenibles.

En esta sección, se analizan detalladamente tanto los desafíos actuales a los que se enfrentan los operadores de estas infraestructuras como las tendencias emergentes que ofrecen soluciones potenciales para avanzar hacia un modelo más sostenible y responsable con el medio ambiente. El análisis proporcionado tiene como objetivo identificar claramente las áreas clave donde es necesario enfocar esfuerzos y las vías estratégicas para capitalizar las oportunidades disponibles, contribuyendo así a un desarrollo equilibrado y sostenible del sector tecnológico global.

6.1. Desafíos actuales en la gestión ambiental de centros de datos

La gestión ambiental en los centros de datos se enfrenta actualmente a diversos desafíos derivados del crecimiento exponencial de la demanda digital y las limitaciones tecnológicas, regulatorias y operativas existentes. Estos desafíos abarcan múltiples dimensiones, incluyendo el consumo energético, la eficiencia en el uso de recursos naturales, la generación de residuos tecnológicos y la complejidad en la gobernanza de la sostenibilidad.

Uno de los desafíos más significativos es la **gestión eficiente del consumo energético**. A pesar de los avances tecnológicos, la alta densidad computacional de los centros de datos continúa generando un consumo considerable, especialmente en refrigeración y en sistemas redundantes para garantizar la disponibilidad operativa. La optimización energética mediante algoritmos inteligentes, refrigeración líquida y energías renovables presenta oportunidades claras, pero también enfrenta obstáculos técnicos y económicos significativos para una implementación masiva y rentable [36,38,62].

El segundo desafío relevante es la **reducción efectiva de la huella hídrica**. El enfriamiento por evaporación y otros sistemas de refrigeración utilizados en muchos centros de datos implican un elevado consumo de agua, generando presión adicional en regiones con escasez hídrica. Además, muchas instalaciones no han adoptado todavía sistemas de refrigeración alternativos o tecnologías cerradas que minimicen el uso directo de agua [63]. Esto genera dilemas operacionales complejos, donde la reducción de la huella hídrica puede aumentar la huella energética y viceversa, demandando soluciones integrales que contemplen ambos impactos simultáneamente [6,7].

Otro desafío es la **gestión sostenible del ciclo de vida del hardware tecnológico**, que implica abordar la rápida obsolescencia de equipos, la generación creciente de residuos electrónicos (*e-waste*) y el consumo intensivo de materiales críticos como metales raros, cuya extracción a menudo genera impactos ambientales y sociales negativos en las comunidades de origen [24,64]. La implementación de esquemas efectivos de economía circular en este ámbito es aún limitada y enfrenta barreras operativas, logísticas y económicas significativas.

Adicionalmente, existe un desafío relacionado con la **complejidad en la interoperabilidad tecnológica y gobernanza ambiental**. La multiplicidad de estándares, certificaciones y regulaciones a nivel global dificulta la creación de un marco coherente que permita evaluar uniformemente el desempeño ambiental de los centros de datos. La falta de armonización regulatoria y metodológica entre regiones y países limita la eficacia del benchmarking global y dificulta la comparación objetiva del desempeño ambiental entre diferentes operadores [58].

Finalmente, los centros de datos se enfrentan a desafíos relacionados con la **gestión de la cadena de suministro tecnológica**. La falta de transparencia y trazabilidad en la obtención de materias primas, componentes electrónicos y equipos informáticos plantea dificultades para evaluar plenamente la sostenibilidad y la responsabilidad social de los proveedores. Aunque existen iniciativas de certificación y transparencia como EPEAT y CDP, la adopción generalizada sigue siendo limitada, requiriendo mayores esfuerzos coordinados para lograr avances sustanciales [63].

La implementación de **tecnologías de virtualización y optimización de tareas** puede reducir el consumo de energía en un 30-40% [64,65]. Modelos como GEECO y EMO-TS han demostrado ser efectivos en la reducción del consumo energético y las emisiones de carbono [36,65].

Por otra parte, la **adopción de fuentes de energía renovable**, como la solar y la eólica, puede disminuir significativamente la huella de carbono de los centros de datos. Sin embargo, la naturaleza intermitente de estas fuentes presenta desafíos en su implementación [66,67].

Además, la **colocación estratégica de centros de datos** en áreas con menor huella de carbono y mejor acceso a energías renovables puede optimizar el uso de recursos y reducir las emisiones [68,69].

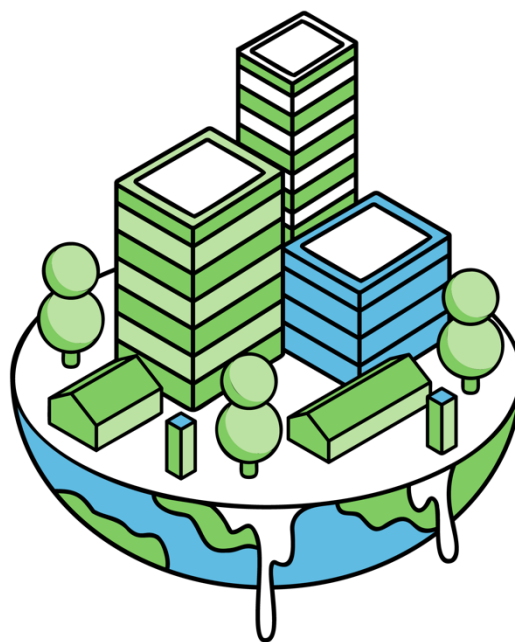
6.2. Innovaciones tecnológicas y tendencias futuras en sostenibilidad

El futuro de la sostenibilidad en centros de datos y proveedores de servicios en la nube está marcado por un conjunto emergente de innovaciones tecnológicas y tendencias disruptivas orientadas a mitigar el impacto ambiental y mejorar la eficiencia en el uso de recursos. Estas innovaciones incluyen desde soluciones de eficiencia energética avanzada hasta estrategias operativas basadas en inteligencia artificial y nuevos enfoques en el diseño de infraestructuras digitales.

Una de las innovaciones más prometedoras es el **desarrollo e implementación de refrigeración líquida directa (*Direct Liquid Cooling, DLC*) y sistemas de refrigeración por inmersión (*Immersion Cooling*)**. Estas tecnologías permiten disipar el calor generado por los equipos informáticos de manera significativamente más eficiente que los métodos tradicionales basados en aire, logrando una reducción notable en el consumo energético asociado a la refrigeración y minimizando la necesidad de infraestructuras auxiliares [71]. La adopción progresiva de estas soluciones se proyecta como tendencia dominante en los próximos años, especialmente en instalaciones de alta densidad computacional. A este

respecto, ZutaCore y Valeo anunciaron en 2024 un acuerdo para la refrigeración de centros de datos para soportar servidores de alta densidad¹³.

Otra innovación tecnológica clave radica en la **adopción extensiva de la inteligencia artificial (IA)** para la gestión predictiva y optimización dinámica de recursos en tiempo real. El uso de IA permite ajustar automáticamente los recursos energéticos y computacionales según la demanda operativa instantánea, reduciendo desperdicios y maximizando la eficiencia. Empresas como Google han demostrado que el uso de IA aplicada al control térmico y energético de sus centros de datos permite reducir hasta un 40% el consumo energético dedicado a refrigeración [72].



La **computación en el borde (edge computing)** también emerge como una tendencia estratégica en sostenibilidad, al disminuir significativamente la necesidad de transmitir grandes volúmenes de datos a través de largas distancias, reduciendo el consumo energético en redes y la necesidad de infraestructuras masivas centralizadas. Este enfoque no solo mejora la eficiencia energética global del sistema, sino que también permite una mejor distribución geográfica de cargas computacionales y, por ende, una menor concentración ambiental en zonas críticas [73].

Una tendencia emergente en sostenibilidad es el **desarrollo de centros de datos submarinos**, como lo evidenció el Proyecto Natick de Microsoft. Los centros submarinos aprovechan el enfriamiento natural del agua marina, eliminando casi completamente la necesidad de refrigeración activa, además de presentar una reducción considerable en fallos de hardware debido a la estabilidad ambiental del entorno submarino. Esta innovación abre nuevas posibilidades para la expansión sostenible de la infraestructura digital global [74].

Adicionalmente, las tendencias futuras también apuntan hacia **una mayor integración de fuentes de energía renovable y sistemas híbridos de almacenamiento energético**. El almacenamiento energético basado en baterías y tecnologías emergentes como el hidrógeno verde ofrecen nuevas oportunidades para garantizar la continuidad operativa y la estabilidad energética, especialmente en combinación con fuentes intermitentes como la solar y eólica [75].

Finalmente, la **economía circular** se consolida como un enfoque integral necesario en la gestión sostenible de centros de datos. La adopción de estrategias de reutilización de equipos, reciclaje selectivo, reacondicionamiento y diseño modular de componentes informáticos promoverá una reducción significativa en la generación de residuos electrónicos y un mejor aprovechamiento de materiales críticos en la industria tecnológica [76].

¹³ <https://www.datacentermarket.es/news/zutacore-y-valeo-anuncian-un-acuerdo-para-la-refrigeracion-de-centros-de-datos/>

6.3. Políticas públicas y regulaciones emergentes

Las políticas públicas y regulaciones emergentes constituyen un factor determinante para avanzar hacia una gestión ambiental sostenible de los centros de datos y servicios de computación en la nube. Diversas regiones han comenzado a desarrollar normativas específicas, impulsadas por el creciente reconocimiento del impacto ambiental del sector tecnológico, así como por compromisos internacionales sobre cambio climático y sostenibilidad energética.

Las políticas públicas emergentes y regulaciones están delineando un nuevo panorama para el sector de centros de datos y servicios en la nube, impulsando estándares más exigentes de desempeño ambiental y creando un marco propicio para la adopción masiva de soluciones tecnológicas sostenibles. Este entorno regulatorio en evolución no solo presenta desafíos significativos, sino también oportunidades claras para aquellos operadores que adopten tempranamente prácticas sostenibles y transparentes en sus operaciones.

En la Unión Europea, destaca el **Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*)**, que establece objetivos ambiciosos para lograr una Europa climáticamente neutra en 2050. Dentro de este marco, la **Directiva sobre Eficiencia Energética (2012/27/UE)** y la más reciente **Directiva de Informes de Sostenibilidad Corporativa (CSRD, *Corporate Sustainability Reporting Directive*)** obligan a los operadores tecnológicos, incluidos centros de datos, a mejorar significativamente la eficiencia energética, reducir emisiones y reportar detalladamente su desempeño ambiental [52].

Asimismo, el **Código de Conducta Europeo sobre Eficiencia Energética en Centros de Datos** desarrollado por la Comisión Europea promueve la adopción voluntaria de mejores prácticas en gestión energética, ofreciendo una plataforma para el intercambio de conocimientos técnicos y la certificación voluntaria de centros de datos que implementan soluciones de eficiencia energética avanzadas [49].

En Estados Unidos, regulaciones como la **Ley de Reducción de la Inflación (*Inflation Reduction Act, IRA*)** promulgada en 2022, establecen fuertes incentivos económicos para la adopción de tecnologías limpias y energías renovables en centros de datos. Esta ley proporciona financiación y créditos fiscales específicos para empresas que inviertan en sistemas energéticos renovables, almacenamiento de energía, infraestructura eléctrica eficiente y tecnologías emergentes, acelerando la transición energética en el sector tecnológico [77].

A nivel global, organismos internacionales como la **Agencia Internacional de la Energía (IEA)** y las **Naciones Unidas**, mediante iniciativas como la **Coalición Digital para la Sostenibilidad Ambiental (CODES)**, están promoviendo marcos regulatorios armonizados que permitan una gestión integrada y eficiente de recursos energéticos y materiales, así como estándares globales para la medición y reducción de la huella ambiental de los centros de datos [78].

Adicionalmente, diversos países están adoptando regulaciones específicas sobre transparencia y gestión de residuos electrónicos, incluyendo obligaciones para fabricantes y operadores tecnológicos en términos de reciclaje, reutilización y reducción de residuos. Un ejemplo claro es la **Directiva Europea sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE/WEEE Directive)**, que impone responsabilidades ampliadas sobre productores y operadores tecnológicos para garantizar un tratamiento ambiental adecuado de los residuos electrónicos generados [79].

Finalmente, en el ámbito de las políticas de agua, regulaciones emergentes en regiones con estrés hídrico significativo buscan limitar y monitorear estrictamente el consumo de agua por parte de centros de datos, estableciendo criterios específicos para el uso responsable del recurso y promoviendo tecnologías de refrigeración alternativas que minimicen el consumo hídrico directo [63].

6.4. Iniciativas públicas y privadas para centros de datos sostenibles en España

En España, la sostenibilidad ambiental asociada a los centros de datos y servicios en la nube se ha convertido en una prioridad estratégica tanto para el sector público como para el privado. El **Ministerio de Transformación Digital y Función Pública** ha anunciado recientemente la creación de una nueva ley específica sobre regulación ambiental para centros de datos. Esta normativa busca gestionar el impacto derivado del alto consumo energético e hídrico de estas infraestructuras tecnológicas, promoviendo la implementación obligatoria de prácticas sostenibles como el uso eficiente de recursos, la incorporación de energías renovables y la reducción efectiva de emisiones de gases de efecto invernadero.

Estas medidas regulatorias responden directamente a las exigencias establecidas en el **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023-2030** y en la **Estrategia España Digital 2025**, ambas orientadas a impulsar una transición energética acelerada y sostenible del país [80,81]. Entre sus objetivos específicos se incluyen la promoción del uso de fuentes renovables, la mejora significativa de la eficiencia energética en instalaciones críticas como los centros de datos, y la adopción de estándares internacionales para asegurar la sostenibilidad de la industria tecnológica española.

A nivel regional, y con el fin de reforzar el carácter operativo de esta normativa, se propone la incorporación de dos indicadores clave —**Power Usage Effectiveness (PUE)** y **Water Usage Effectiveness (WUE)**— en los Planes y Proyectos de Interés General de Aragón (PIGAS). El PUE, que mide la relación entre la energía total consumida por la instalación y la energía destinada exclusivamente a la carga de TI, y el WUE, que cuantifica el consumo de agua por unidad de trabajo computacional, permitirán:

- Homogeneizar criterios de evaluación: establecer umbrales máximos de PUE (por ejemplo, <1,4) y WUE (por ejemplo, <0,5 L/kWh) en los requisitos de los proyectos para garantizar un nivel mínimo de eficiencia antes de la autorización administrativa.
- Fomentar la comparación y el benchmarking: facilitar que los operadores y las autoridades puedan comparar el desempeño de distintas instalaciones y promover las mejores prácticas.
- Impulsar la mejora continua: vincular las revisiones periódicas de los DIGAS y PIGAS a la consecución de objetivos decrementales de PUE y WUE a 1, 3 y 5 años vista.
- Asegurar la transparencia: publicar anualmente los valores de PUE y WUE alcanzados, de modo que tanto los organismos reguladores como la sociedad civil puedan verificar el grado de cumplimiento.

La adopción de estos indicadores en Aragón serviría de modelo replicable al resto de comunidades autónomas y situaría a España a la vanguardia de las buenas prácticas internacionales en gestión energética e hídrica de centros de datos. Para su correcta implementación, se recomienda:

1. Definir metodologías de medición. Establecer protocolos estandarizados para el cálculo de PUE y WUE, basados en las normas ISO 30134-2 (PUE) y EN 50600-4-2 (WUE), que incluyan frecuencias de lectura, puntos de medición y criterios de auditoría técnica.
2. Integración en los procedimientos de evaluación ambiental. Modificar las guías metodológicas de los DIGAS y PIGAS para incorporar secciones específicas dedicadas a la justificación de las estimaciones de PUE y WUE, así como a los planes de mejora continua que se comprometen a ejecutar los promotores.
3. Mecanismos de verificación y sanción. Designar organismos independientes (públicos o acreditados) encargados de auditar estos indicadores y establecer incentivos (bonificaciones en la tasa administrativa, líneas de financiación verde) para las instalaciones que superen los estándares definidos, así como sanciones proporcionales a los incumplimientos.
4. Formación y difusión. Desarrollar programas de formación para consultores ambientales, ingenierías y responsables de centros de datos sobre el cálculo y la interpretación de PUE y WUE, además de campañas de sensibilización para la ciudadanía y otros actores clave.

Simultáneamente, el sector privado está realizando importantes inversiones en infraestructuras sostenibles que posicionan a España como referente europeo en centros de datos y servicios *cloud*. Amazon Web Services (AWS), por ejemplo, ha anunciado recientemente una inversión de aproximadamente 15.700 millones de euros para la construcción de varios centros de datos en Aragón¹⁴, con el firme compromiso de operar exclusivamente con energías renovables, y estableciendo medidas específicas para minimizar el impacto ambiental y la huella hídrica.

Del mismo modo, Microsoft ha anunciado inversiones por valor de 6.690 millones de euros para desarrollar nuevas infraestructuras de nube en la misma región¹⁵. Estas instalaciones adoptarán las últimas tecnologías disponibles en eficiencia energética, como la refrigeración líquida directa y sistemas inteligentes de optimización energética basados en inteligencia artificial. Asimismo, se espera que estos nuevos centros contribuyan significativamente a reducir la huella de carbono operativa del sector tecnológico español.

Estas iniciativas conjuntas están generando un efecto catalizador en otras regiones del país, que buscan atraer inversiones similares mediante la creación de parques tecnológicos sostenibles, impulsados por colaboraciones público-privadas y alineados con los objetivos

¹⁴ <https://www.reuters.com/technology/amazon-web-services-invest-1702-bln-data-centres-spain-2024-05-22>

¹⁵ <https://www.reuters.com/technology/microsoft-invest-716-bln-new-data-centres-northeastern-spain-2024-06-14/>

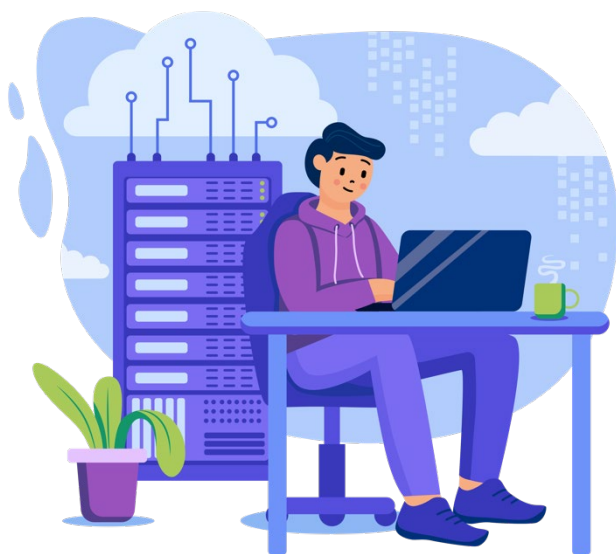
estratégicos nacionales y europeos de sostenibilidad digital. España, así, se posiciona como un entorno líder en Europa para el desarrollo sostenible de infraestructuras digitales, ofreciendo un marco regulatorio claro, incentivos específicos y una apuesta decidida por la innovación tecnológica orientada a la sostenibilidad.

7. Conclusiones

Finalmente, esta sección sintetiza las principales reflexiones derivadas del análisis exhaustivo de evidencias, publicaciones técnicas, artículos académicos, informes sectoriales y normativas vigentes relacionadas con el impacto ambiental de los centros de datos y proveedores de servicios en la nube.

En primer lugar, el análisis realizado muestra claramente que los centros de datos y servicios de computación en la nube presentan **impactos ambientales significativos** debido a su **alto consumo energético** y **elevado uso de recursos hídricos**. La expansión acelerada del sector, impulsada por el crecimiento exponencial del tráfico digital y las tecnologías emergentes, genera presiones importantes en términos de sostenibilidad, especialmente en regiones con estrés hídrico o dependencia de fuentes de energía fósil.

Así mismo, este trabajo revela una **tendencia positiva** en la conciencia y la adopción de **prácticas sostenibles** dentro del sector. Se observa una creciente implementación de estrategias avanzadas para mejorar la eficiencia energética mediante algoritmos inteligentes, tecnologías emergentes como la refrigeración líquida directa, la computación en el borde y la inteligencia artificial para la optimización de recursos. Estos avances tecnológicos son fundamentales para mitigar los impactos negativos y reducir significativamente la huella ecológica asociada a estas infraestructuras.



La **ubicación estratégica** de los centros de datos ha emergido como un aspecto crítico en la reducción de impactos ambientales. Se identifican ventajas notables en la elección de sitios con condiciones climáticas favorables, acceso directo a fuentes de energías renovables y menores demandas de refrigeración, lo que disminuye sustancialmente el consumo energético y la dependencia hídrica directa e indirecta.

Desde el **ámbito regulatorio**, especialmente en la Unión Europea y particularmente en España, se ha identificado un fuerte impulso hacia políticas públicas y regulaciones específicas que promueven la

sostenibilidad en el sector tecnológico. Iniciativas como el Pacto Verde Europeo y recientes regulaciones españolas sobre centros de datos sostenibles están definiendo claramente los estándares exigibles en eficiencia energética, uso responsable del agua y gestión adecuada de residuos electrónicos, fomentando así una mayor transparencia y responsabilidad ambiental en la industria.

El informe también evidencia que los principales actores globales del sector tecnológico, incluyendo a AWS, Microsoft Azure y Google Cloud, están liderando iniciativas ambiciosas para avanzar hacia la **neutralidad en carbono** y la **sostenibilidad operativa**. Estos actores

están realizando importantes inversiones en energías renovables, tecnologías avanzadas y prácticas innovadoras que permiten reducciones significativas en su huella ambiental global.

No obstante, se identifican **desafíos críticos** que aún requieren atención prioritaria. La gestión sostenible de residuos electrónicos, la transparencia y trazabilidad en la cadena de suministro tecnológica y la reducción del estrés hídrico en regiones vulnerables siguen siendo retos complejos que necesitan estrategias específicas y soluciones innovadoras para alcanzar mejoras sostenibles efectivas.

Finalmente, el análisis concluye destacando las **oportunidades significativas** derivadas de la innovación tecnológica, la economía circular y la cooperación público-privada. Estas oportunidades son esenciales para enfrentar los desafíos ambientales actuales y asegurar la transición hacia un modelo de infraestructura tecnológica más sostenible, resiliente y compatible con los objetivos globales de sostenibilidad ambiental.

Glosario

AI (Inteligencia Artificial)

Conjunto de técnicas y herramientas que permiten a máquinas realizar tareas que requieren inteligencia humana, como reconocimiento de patrones, toma de decisiones o procesamiento de lenguaje.

AWS (Amazon Web Services)

Plataforma de servicios en la nube de Amazon, que incluye cómputo (EC2), almacenamiento (S3), bases de datos (RDS), inteligencia artificial, redes y más.

Benchmarking

Proceso de comparación de métricas de rendimiento propias frente a las de otros actores del sector, con el fin de identificar mejores prácticas y oportunidades de mejora.

Ciberseguridad

Conjunto de técnicas, procesos y controles destinados a proteger sistemas, redes y datos frente a amenazas digitales.

Cloud (Computación en la Nube)

Modelo de provisión de servicios informáticos a través de Internet, que permite acceder a recursos escalables (servidores, almacenamiento, aplicaciones) bajo demanda, con pago por uso (bajo demanda).

EDGE Computing

Arquitectura distribuida que acerca el procesamiento de datos al lugar donde se generan (dispositivos o “el borde” de la red), reduciendo latencias y carga en centros de datos centrales.

EN 50600

Familia de normas europeas para el diseño, construcción y gestión de centros de datos.

EN 50600-4-2: especifica la medición del Water Usage Effectiveness (WUE).

EN 50600-4-1: trata de la medición del Power Usage Effectiveness (PUE).

Eficiencia energética

Relación entre el servicio obtenido (por ejemplo, procesamiento de datos) y la energía consumida, cuyo objetivo es maximizar rendimiento minimizando consumo.

Energy Recovery

Técnicas para aprovechar el calor residual de los centros de datos, por ejemplo, para climatización de edificios colindantes o sistemas de calefacción urbana.

EPA (Environmental Protection Agency)

Agencia de protección ambiental de Estados Unidos, referencia internacional en estándares de emisiones y control de residuos.

GPU (Graphics Processing Unit)

Procesador especializado en cómputo paralelo, fundamental para aplicaciones de inteligencia artificial y procesamiento de gráficos.

Green IT

Prácticas tecnológicas que buscan minimizar el impacto ambiental de los sistemas de información, incluyendo diseño de hardware eficiente, optimización de software y uso de energías renovables.

HC (Hydraulic Capacity)

Capacidad hidráulica de los sistemas de enfriamiento, vinculada al WUE y al diseño de circuitos de agua.

IaaS (Infrastructure as a Service)

Modelo de servicio en la nube que proporciona recursos informáticos virtualizados (máquinas, redes, almacenamiento) gestionados por el proveedor.

IEC (International Electrotechnical Commission)

Organización internacional que publica estándares en el ámbito de la electricidad, electrónica y tecnologías afines.

ISO (International Organization for Standardization)

Organismo de estandarización que desarrolla normas internacionales, como ISO 30134-2 para PUE.

ISO 30134-2

Norma que define la metodología y criterios para calcular el Power Usage Effectiveness (PUE) en centros de datos.

KPIs (Key Performance Indicators)

Indicadores clave de rendimiento que permiten medir de forma cuantitativa el grado de cumplimiento de objetivos (p. ej., PUE, WUE, emisiones CO₂).

Latencia

Tiempo que tarda un paquete de datos en ir de un punto a otro de la red; factor crítico en servicios en tiempo real y edge computing.

ML (Machine Learning)

Subcampo de la inteligencia artificial centrado en algoritmos que aprenden patrones y toman decisiones a partir de datos históricos.

Microgrids

Red eléctrica local que puede operar de manera autónoma, integrando fuentes renovables y almacenamiento en baterías para centros de datos.

Operador de Red (TSO/DSO)

Empresas que gestionan la transportista (TSO) y distribuidora (DSO) de energía eléctrica, clave para acuerdos de compra de renovables y certificados REC.

PaaS (Platform as a Service)

Modelo de servicio en la nube que ofrece plataformas de desarrollo y ejecución de aplicaciones sin gestionar la infraestructura subyacente.

PCI DSS (Payment Card Industry Data Security Standard)

Conjunto de requisitos de seguridad para el procesamiento y almacenamiento de datos de tarjetas de pago, relevante para centros de datos que manejan información financiera.

PIGAS (Plan de Investigación de Grandes Actuaciones Sectoriales)

Plan de la Comunidad de Aragón que define proyectos de investigación y desarrollo de gran escala, incluyendo requisitos ambientales.

PUE (Power Usage Effectiveness)

Indicador de eficiencia energética, calculado como la relación entre la energía total consumida por el centro de datos y la energía destinada a la carga de TI (ideal <1,4).

QoS (Quality of Service)

Conjunto de técnicas y métricas que garantizan niveles de rendimiento en redes y servicios, como ancho de banda, latencia y disponibilidad.

REC (Renewable Energy Certificate)

Certificado que avala que cierta cantidad de energía eléctrica proviene de fuentes renovables, usado en esquemas de compra de capacidad verde.

ROI (Return on Investment)

Métrica financiera que mide la rentabilidad de una inversión: $(\text{beneficio neto} / \text{coste de la inversión}) \times 100$.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)

Sistemas de control industrial que facilitan la monitorización y gestión remota de procesos (climatización, potencia, refrigeración).

SLA (Service Level Agreement)

Acuerdo de nivel de servicio que define métricas de calidad, disponibilidad y penalizaciones, esencial en contratos de servicios cloud.

TCO (Total Cost of Ownership)

Cálculo del coste total de una infraestructura o sistema a lo largo de su vida útil, incluyendo adquisición, operación, mantenimiento y desmantelamiento.

Uptime

Porcentaje de tiempo que un servicio o centro de datos está operativo sin interrupciones; se mide generalmente con SLA (por ejemplo, 99,99 %).

Virtualización

Técnica que permite abstraer recursos hardware mediante software, ejecutando múltiples sistemas operativos o contenedores en un mismo servidor físico.

WUE (Water Usage Effectiveness)

Indicador de eficiencia hídrica, medido como litros de agua consumidos por cada kilovatio-hora de energía de TI utilizada (ideal <0,5 L/kWh).

Zero Carbon

Objetivo o certificación que indica que una instalación no genera emisiones netas de CO₂, ya sea por eficiencia, uso de renovables o compensaciones.

Bibliografía

- [1] Uptime Institute. Tier Classification System. Disponible en: <https://uptimeinstitute.com/tiers>
- [2] Power usage effectiveness (PUE). ISO/IEC 30134-2:2016. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/63451.html>
- [3] Greenhouse Gas Protocol. Disponible en: <https://ghgprotocol.org/>
- [4] Cloud Security Alliance España e ISMS Forum Spain. Estudio Green Cloud. Disponible en: <https://www.ismsforum.es/ficheros/descargas/estudio-green-cloud1663784543.pdf>
- [5] Cloud Security Alliance España e ISMS Forum Spain. II Estudio Green Cloud. Disponible en: <https://www.ismsforum.es/ficheros/descargas/ii-estudio-green-cloud1705480911.pdf>
- [6] Siddik, M., Shehabi, A., & Marston, L. The environmental footprint of data centers in the United States. *Environmental Research Letters*, 2021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfba1>
- [7] Kez, D., Foley, A., Lavery, D., Del Rio, D., & Sovacool, B. Exploring the sustainability challenges facing digitalization and internet data centers. *Journal of Cleaner Production*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133633>
- [8] Monserrate, S. The Cloud Is Material: On the Environmental Impacts of Computation and Data Storage. *MIT Case Studies in Social and Ethical Responsibilities of Computing*. 2022. <https://doi.org/10.21428/2c646de5.031d4553>
- [9] Rong, H., Zhang, H., Xiao, S., Li, C., & Hu, C. Optimizing energy consumption for data centers. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.12.283>
- [10] Posani, L. The environmental footprint of a distributed cloud storage. *ArXiv*, 2018. <https://arxiv.org/abs/1803.06973>
- [11] Madnawat, A. Comparative Analysis of Sustainability, Carbon Footprint, and AI's Role in Reducing Emissions Across AWS, Azure, and Google Cloud. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 2024. <https://doi.org/10.55041/ijserm37115>
- [12] Vaishnavi, P., & Ananthi, S. Environmental Impact Study on Carbon Footprint Emission and Development of Software Architectural Framework to Measure the Level of Emission in Cloud Services. *Reliability and Risk Assessment in Engineering*. Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3746-2_14
- [13] Jayalath, J., Chathumali, E., Kothalawala, K., & Kuruwitaarachchi, N. Green Cloud Computing: A Review on Adoption of Green-Computing attributes and Vendor Specific Implementations. 2019 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE), 2019. <https://doi.org/10.23919/SCSE.2019.8842817>
- [14] Shojaifar, M., Canali, C., Lancellotti, R., & Abawajy, J. Adaptive Computing-Plus-Communication Optimization Framework for Multimedia Processing in Cloud Systems. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2020. <https://doi.org/10.1109/TCC.2016.2617367>
- [15] Wilkinson, R., Mleczo, M., Brewin, R., Gaston, K., Mueller, M., Shutler, J., Yan, X., & Anderson, K. Environmental impacts of earth observation data in the constellation and cloud

computing era. Science of the total environment, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168584>

[16] Massachusetts Green High Performance Computing Center (MGHPCC). Disponible en: <https://www.mghpcc.org/>

[17] Shehabi, A. et al. (2024). 2024 United States Data Center Energy Usage Report. Lawrence Berkeley National Laboratory. Disponible en: <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/2024-12/lbnl-2024-united-states-data-center-energy-usage-report.pdf>

[18] International Energy Agency (2023). Electricity Market Report 2023. IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023>

[19] The Green Grid (2007). Green Grid Metrics: Describing Data Center Power Efficiency. Disponible en: https://leonardo-energy.pl/wp-content/uploads/2018/03/Green_Grid_Metrics.pdf

[20] Koomey, J. (2011). Growth in data center electricity use 2005 to 2010. Analytics Press.

[21] Masanet, E. et al. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. Science, 367(6481). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aba3758>

[22] The Green Grid (2011). Water Usage Effectiveness (WUE): A Green Grid Data Center Sustainability Metric.

[23] Andrae, A. S. G., & Edler, T. (2015). On global electricity usage of communication technology: Trends to 2030. Challenges, 6(1). <https://doi.org/10.3390/challe6010117>

[24] Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (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). Disponible en: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf

[25] European Commission (2012). Directive 2012/19/EU on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Official Journal of the European Union. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj/eng>

[26] Boulay, A. M. et al. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: Assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). The International Journal of Life Cycle Assessment, 23(2). <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>

[27] The Green Grid (2012). Carbon Usage Effectiveness (CUE): A Green Grid Data Center Sustainability Metric.

[28] Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 2021. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-and-sustainable-energy-reviews/vol/145/suppl/C>

[29] McMullen, M., & Wemhoff, A. Data Center Environmental Burden Reduction Through On-Site Renewable Power Generation. ASME Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities, 2024. <https://doi.org/10.1115/1.4065053>

- [30] McMullen, M., & Wemhoff, A. Data Center Environmental Burden Reduction Through On-Site Renewable Power Generation. ASME 2023 17th International Conference on Energy Sustainability, 2023. <https://doi.org/10.1115/es2023-107496>
- [31] Cao, Z., Zhou, X., Hu, H., Wang, Z., & Wen, Y. Toward a Systematic Survey for Carbon Neutral Data Centers. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021. <https://doi.org/10.1109/comst.2022.3161275>
- [32] Chen, L., & Wemhoff, A. The sustainability benefits of economization in data centers containing chilled water systems. Resources, Conservation and Recycling, 2023 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107053>
- [33] Virmani, S. Investigating the Environmental Sustainability of Data Centers. The American Journal of Student Research, 2025. <https://doi.org/10.70251/hyjr2348.311018>
- [34] Qi, S., Milojevic, D., Bash, C., & Pasricha, S. SHIELD: Sustainable Hybrid Evolutionary Learning Framework for Carbon, Wastewater, and Energy-Aware Data Center Management. Proceedings of the 14th International Green and Sustainable Computing Conference, 2023. <https://doi.org/10.1145/3634769.3634810>
- [35] Jiang, Y., Roy, R., Kanakagiri, R., & Tiwari, D. WaterWise: Co-optimizing Carbon- and Water-Footprint Toward Environmentally Sustainable Cloud Computing, 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.17944>
- [36] Mondal, S., Faruk, F., Rajbongshi, D., Efaz, M., & Islam, M. GEECO: Green Data Centers for Energy Optimization and Carbon Footprint Reduction. Sustainability, 2023. <https://doi.org/10.3390/su152115249>
- [37] OECD (2021). Data Centres and Local Development: Enabling Digital Innovation and Growth. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- [38] Avgerinou, M., Bertoldi, P., & Castellazzi, L. (2017). Trends in data centre energy consumption under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency. Energy Efficiency, 10(5). <https://doi.org/10.3390/en10101470>
- [39] Amnesty International (2016). This is what we die for: Human rights abuses in the Democratic Republic of the Congo power the global trade in cobalt. Disponible en: <https://www.amnesty.org/en/documents/afr62/3183/2016/en/>
- [40] Reglamento General de Protección de Datos (RGPD). Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2016/119/L00001-00088.pdf>
- [41] Beloglazov, A., Abawajy, J., & Buyya, R. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for Cloud computing. Future Generation Computer Systems, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.future.2011.04.017>
- [42] Shekhar, A., & Aleem, A. Improving Energy Efficiency through Green Cloud Computing in IoT Networks. 2024 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (IC2PCT), 2024. <https://doi.org/10.1109/IC2PCT60090.2024.10486633>
- [43] Mahadasa, R. Toward Green Clouds: Sustainable Practices and Energy-Efficient Solutions in Cloud Computing. Asia Pacific Journal of Energy and Environment, 2016. <https://doi.org/10.18034/apjee.v3i2.713>

- [44] Sustainable Cloud Computing: Leveraging FinOps for Environmental Responsibility. Journal of Artificial Intelligence & Cloud Computing, 2023. [https://doi.org/10.47363/jaicc/2023\(2\)293](https://doi.org/10.47363/jaicc/2023(2)293)
- [45] Mahadevan, S. Clouding the Future: Innovating Towards Net-Zero Emissions. International Journal of Computing and Engineering, 2024. <https://doi.org/10.47941/ijce.2127>
- [46] Aujla, G., & Kumar, N. MEnSuS: An efficient scheme for energy management with sustainability of cloud data centers in edge-cloud environment. Future Generation Computer Systems. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.09.066>
- [47] ISO (2015). ISO 14001:2015 – Environmental management systems – Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- [48] Uptime Institute (2021). Efficient IT Stamp of Approval. Uptime Institute. Disponible en: <https://uptimeinstitute.com/professional-services/efficient-it/efficient-it-assessment>
- [49] European Commission, Joint Research Centre (2022). EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency. Disponible en: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/energy-efficiency/energy-efficiency-products/code-conduct-ict/european-code-conduct-energy-efficiency-data-centres_en
- [50] U.S. Green Building Council (USGBC) (2020). LEED for Data Centers. Leadership in Energy and Environmental Design. Disponible en: <https://www.usgbc.org/discoverleed/certification/bd-c-data-centers/>
- [51] Environmental Protection Agency (EPA) (2020). ENERGY STAR for Data Centers. Disponible en: https://www.energystar.gov/products/data_centers
- [52] European Parliament and Council (2022). Directive (EU) 2022/2464 on Corporate Sustainability Reporting (CSRD). Official Journal of the European Union. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32022L2464>
- [53] AWS Sustainability. Disponible en: <https://sustainability.aboutamazon.com/products-services/aws-cloud>
- [54] Google Sustainability. Disponible en: <https://cloud.google.com/sustainability>
- [55] Microsoft Sustainability. Disponible en: <https://azure.microsoft.com/es-es/explore/global-infrastructure/sustainability/>
- [56] IBM Environmental Leadership. Disponible en: <https://www.ibm.com/impact/environmental>
- [57] Alibaba Progresses Towards Carbon Neutrality Goals and Digital Inclusion: 2024 ESG Report. Disponible en: <https://www.alibabagroup.com/en-US/document-1752127870676762624>
- [58] Uptime Institute Global Data Center Survey 2024. Disponible en: <https://uptimeinstitute.com/resources/research-and-reports/uptime-institute-global-data-center-survey-results-2024>

- [59] Greenpeace Clicking Clean Report. Disponible en: <https://www.greenpeace.org/usa/reports/click-clean-virginia/>
- [60] Corporate Knights & As You Sow, Carbon Clean 200, 2024. Disponible en: <https://www.corporateknights.com/rankings/clean-200-rankings/2024-clean-200/clean-200-green-transition-full-flight/>
- [61] CDP (Carbon Disclosure Project). Disponible en: <https://www.cdp.net/en>
- [62] Bharany, S., Sharma, S., Khalaf, O., Abdulsahib, G., Humaimedy, A., Aldhyani, T., Maashi, M., & Alkahtani, H. A Systematic Survey on Energy-Efficient Techniques in Sustainable Cloud Computing. Sustainability. 2022 <https://doi.org/10.3390/su14106256>
- [63] Mytton, D. (2021). Data centre water consumption. npj Clean Water, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00101-w>
- [64] Khedkar, V. The Carbon Conundrum: A Systematic Analysis of Environmental Impacts in Large-Scale Cloud Computing Infrastructure. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology, 2024. <https://doi.org/10.32628/cseit241061115>
- [65] Nambi, S., & Thanapal, P. EMO-TS: An Enhanced Multi-Objective Optimization Algorithm for Energy-Efficient Task Scheduling in Cloud Data Centers. IEEE Access, 2025. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3527031>
- [66] Deng, W., Liu, F., Jin, H., Li, B., & Li, D. Harnessing renewable energy in cloud datacenters: opportunities and challenges. IEEE Network, 2014. <https://doi.org/10.1109/MNET.2014.6724106>
- [67] Xu, M., & Buyya, R. Managing renewable energy and carbon footprint in multi-cloud computing environments. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2019.09.015>
- [68] Khosravi, A., Garg, S., & Buyya, R. Energy and Carbon-Efficient Placement of Virtual Machines in Distributed Cloud Data Centers. Euro-Par 2013 Parallel Processing (Euro-Par 2013). https://doi.org/10.1007/978-3-642-40047-6_33
- [69] Rawas, S., Zekri, A., & El-Zaart, A. LECC: Location, energy, carbon and cost-aware VM placement model in geo-distributed DCs. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.100649>
- [70] Global Electronics Council (EPEAT). Disponible en: <https://globalecolabelling.net/organisation/epeat/>
- [71] ASHRAE Technical Committee 9.9. (2021). Liquid Cooling Guidelines for Datacom Equipment Centers. Disponible en: <https://tc0909.ashraetcs.org/documents/>
- [72] DeepMind. (2016). DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40%. Disponible en: <https://deepmind.google/blog/article/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-40>
- [73] Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. IEEE Internet of Things Journal, 3(5). <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>

- [74] Microsoft Project Natick. (2020). Underwater datacenter has promising future. Disponible en: <https://news.microsoft.com/innovation-stories/project-natick-underwater-datacenter/>
- [75] International Energy Agency (IEA). (2023). Energy Storage Technology Roadmap. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmaps>
- [76] Ellen MacArthur Foundation. (2020). Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change. Disponible en: <https://ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture>
- [77] Inflation Reduction Act (IRA), EE.UU. (2022). Disponible en: <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376>
- [78] Coalition for Digital Environmental Sustainability (CODES). Naciones Unidas. Disponible en: <https://www.sparkblue.org/CODES>
- [79] Directiva RAEE (2012/19/EU). Directiva sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0019>
- [80] Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC 2023-2030). Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/estrategia-normativa/pniec-23-30.html>
- [81] Estrategia España Digital 2025. Disponible en: <https://avance.digital.gob.es/programas-avance-digital/Paginas/espana-digital-2025.aspx>



Con el apoyo de:



Elaborado por:

ecodes
tiempo de actuar