

Impacto ambiental de la transformación digital: análisis sistémico de los datos

Environmental impact of digital transformation: systemic data analysis

Heddy Lu Josefina Giménez Naim*, **Luisa Mercedes Escalona**

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” (UNEXPO). Lara, Venezuela.

Artículo de investigación

***Autor de correspondencia:** hgimenez@unexpo.edu.ve

Recibido: 15/06/2025

Recibido en forma revisada: 13/07/2025

Aceptado: 19/07/2025

Resumen

El artículo analiza sistémicamente el impacto ambiental de los datos en su transformación digital mediante una revisión bibliográfica exhaustiva, integrando la caracterización del ciclo de vida del dato, la estimación de la huella de carbono en base al Protocolo de Gases Efecto Invernadero (Protocolo GHG) y de acuerdo al análisis se presentan propuestas de estrategias apoyadas en criterios de economía circular. El análisis enfocado en el dato, también ofrece información relevante sobre los centros de datos y las infraestructuras de telecomunicaciones o tecnológicas que transportan los datos, en virtud de su importancia en la huella de carbono de forma indirecta. Se evidencia que los datos, producto del análisis de su ciclo de

vida (ACV) generan un factor de contribución kWh por cada GB, lo cual empieza a tener relevancia para realizar estudios como este y tomar en consideración la acumulación de los datos y su impacto. La transformación digital ha provocado que las empresas se digitalicen y produzca un aumento en la cantidad de datos, por lo que es conveniente la generación de medidas que puedan contribuir a minimizar la huella de carbono asociada con la generación y almacenamiento de datos, basadas en los criterios de economía circular, alineadas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) hacia la meta de cero (0) emisiones netas.

Palabras Clave: datos, transformación digital, análisis del ciclo de vida, huella de carbono, economía circular

Heddy Lu Josefina Giménez Naim. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0068-1590>. Ingeniero Electrónico (UNEXPO). Magíster en Gerencia Empresarial (UFT). Doctorante del Programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Mención Productividad (UNEXPO). Docente a dedicación exclusiva categoría Agregado del Departamento de Ingeniería Electrónica (UNEXPO).

Luisa Mercedes Escalona. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1074-8015>. Ingeniero Electrónico (UNEXPO). Doctora en Ciencias de la Ingeniería mención Productividad. Docente Jubilada del Departamento de Ingeniería Electrónica de la UNEXPO y Docente activa del Programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería mención Productividad-UNEXPO

Abstract

This article systemically analyzes the environmental impact of data in digital transformation through a comprehensive literature review. It integrates characterization of the data lifecycle, estimation of carbon footprints based on the Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol), and based on the analysis, proposals for strategies supported by circular economy criteria are presented. The data-centric analysis also examines data centers and telecommunications/technological infrastructures transporting data, given their indirect contribution to carbon footprints. Findings reveal that data, through its lifecycle assessment (LCA), generates a kWh-per-GB contribution factor, establishing a critical metric for studies assessing cumulative data impacts. Digital transformation has accelerated corporate digitization, escalating data volumes and necessitating measures to minimize associated carbon emissions from data generation and storage. Consequently, circular economy principles aligned with Sustainable Development Goals (SDGs) toward net-zero emissions are proposed as imperative frameworks for mitigation.

Keywords: data, digital transformation, life cycle assessment, carbon footprint, circular economy

1. Introducción

La apropiación tecnológica empresarial ha impulsado una era donde los datos se han masificado para crear patrones que permitan la transformación digital y la automatización, orientando a las organizaciones hacia modelos emergentes, inteligentes y predictivos (Ivanov, 2023).

La digitalización, definida como “la conversión de los datos y procesos analógicos en un formato legible por máquinas” (Trujillo et al., 2022), sustenta la transformación digital como un proceso evolutivo que combina innovaciones tecnológicas en pro de la metamorfosis de procesos industriales y de negocios, desde una perspectiva holística (Delgado, 2021; Ávila-Guerrero *et al.* 2023).

En este contexto, los datos emergen como el “nuevo petróleo”, constituyéndose en activos estratégicos (Barone, 2022), cuya gestión define la trayectoria de las organizaciones (UNIR, 2024). No obstante, como elemento aislado, el dato carece de valor intrínseco, requiriendo su interpretación para convertirse en una representación de los hechos (Yébenes, 2022).

Esta labor requiere de recursos y esfuerzos humanos y tecnológicos (Hussain *et al.*, 2021), especialmente ante la generación de grandes volúmenes de datos que según Jackson y Hodgkinson (2023b)

citando a la ONU (2022) exponen que el enfoque de almacenarlo todo adoptado por muchas organizaciones, amenaza la meta del cero (0) de emisiones netas.

El presente artículo tiene como propósito analizar el impacto ambiental de los datos generados y almacenados a nivel mundial, centrado en terminales, centros de datos e infraestructuras de red (The Shift Project, 2024), mediante un enfoque sistémico integrado por el ACV, la huella de carbono como indicador clave y estrategias de economía circular para mitigación.

2. Metodología

Esta investigación adopta un abordaje metodológico documental basado en revisión sistémica de literatura científica. Para ello, se consideraron cuatro (4) etapas:

- 1) Caracterización de las fases del ACV de los datos.
- 2) Identificación de indicadores relevantes para evaluar el impacto en el medio ambiente, enfocados en el análisis de las emisiones, el consumo energético y la generación de residuos digitales.
- 3) Análisis y síntesis de los diferentes factores que afectan el cálculo de la huella de carbono.
- 4) Propuesta de mejora con el desarrollo de medidas concretas para reducir la huella de carbono.

Para la selección del material, se establecieron criterios de inclusión y exclusión. En cuanto a los criterios de inclusión se consideraron artículos académicos, informes científicos, tesis doctorales, además de reportes institucionales y documentos de organismos internacionales, como *World Resources Institute* (WRI), Organización de Naciones Unidas (ONU), entre otros, recientes de los últimos 5 años, con metodología clara y transparente.

Los criterios de exclusión se centraron en el tipo de fuente, principalmente, bases de datos y recursos de *Google Scholar*, *Scopus*, *Web of Science*, *Scencedirect*, repositorios institucionales e informes técnicos, utilizando palabras claves y operadores booleanos.

La selección de las referencias bibliográficas fue sometida a criterios como: artículos originales en revistas con revisión de pares e índices de impacto, actualidad de las publicaciones, autoría por investigadores afiliados a instituciones académicas o de investigación, claridad en la metodología y presentación de resultados.

La combinación de criterios de inclusión y exclusión, junto con estrategias de búsqueda bien diseñadas, permitieron un trabajo más profundo, riguroso y centrado, evitando distracciones y asegurando que el

tiempo y los recursos se utilicen de manera óptima.

3. Resultados y discusión

La transformación digital guía la toma de decisiones, a través de datos digitalizados y procesados, sustentada por tecnologías como computación en la nube, *Big Data*, Inteligencia Artificial (IA), Internet de las Cosas (IoT), Robótica, *Blockchain*, entre otras; generando valor en todas las áreas de la organización (Delgado, 2021).

Dentro de este marco de ideas, el análisis de los datos puede basarse en el ACV del producto (DAMA Internacional, 2017), definido por la ISO 14040 (2006) que toma en cuenta las entradas, las salidas y sus impactos ambientales potenciales.

Entre los modelos de ACV del dato se destacan el estudio de DAMA Internacional (2017) que identifica siete (7) fases: planear, diseñar y habilitar, crear/obtener, almacenar/mantener, usar, mejorar y purgar. IBM (2013) ofrece una revisión desde que los datos ingresan hasta que se destruyen, separados en fases y toma en consideración la protección de los datos y su recuperación ante eventos, con la gestión de datos de prueba, enmascaramiento de datos, privacidad y archivado.

Modelos como el propuesto por Elmekki *et al.* (2019), citado por Hussain *et al.* (2021)

en relación a los datos de Gobierno Abierto, hace referencia a nueve (9) fases: recopilación, publicación, transformación, calidad, uso, interoperabilidad, intercambio, comentarios de los usuarios y archivo de datos. Por último, Hussain *et al.* (2021) citando a Gislaine *et al.* (2021), resaltan cuatro (4) fases, en relación a los datos en información científica: recopilación, almacenamiento, visualización de datos y eliminación de datos.

Para el caso estudio (Figura 1), las autoras toman en cuenta siete (7) fases principales, escogidas a partir de la información antes expuesta, las cuales son: creación, almacenamiento, procesamiento y análisis, visualización, uso y aplicaciones, preservación y eliminación.



Figura 1. Fases del ciclo de vida de los datos (seleccionadas para el estudio).

Esta selección se fundamenta en el análisis comparativo de los modelos expuestos, sintetizando elementos comunes y

priorizando fases relevantes para entornos industriales actuales, asimismo, integra las fases críticas omitidas por otros modelos, como la preservación y eliminación, ambas respaldadas a las investigaciones de la gestión de datos vinculada a Jackson y Hodgkinson.

En este contexto, la huella de carbono digital, define y cuantifica las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) liberadas a la atmósfera como resultado de las actividades vinculadas con el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), especialmente los datos (Castañeda, 2022). Su naturaleza compleja requiere que se consideren elementos como redes o infraestructura de telecomunicaciones, centros de datos, hardware y software utilizados.

La referencia de cálculo más utilizada es el Protocolo GHG que clasifica tres (3) alcances: alcance 1, se entiende por emisiones directas, aquellas que ocurren de fuentes que

son propiedad o están controladas por la empresa. Las emisiones de alcance 2, emisiones indirectas, son aquellas generadas por la utilización de la energía eléctrica, calor o vapor de agua adquiridos de fuera. Las emisiones de alcance 3, otras emisiones indirectas, son las emisiones de los productos y servicios de la organización, las cuales están inducidas por las actividades de la empresa, pero ocurren en fuentes que no son propiedad ni están controladas por la empresa (Factor CO₂, 2020).

Para el caso estudio (Figura 2), las emisiones directas (alcance 1), toman en consideración el consumo energético en procesamiento y almacenamiento de datos; emisiones indirectas (alcance 2), analizan la energía de infraestructura de red en dominio del cliente, y otras emisiones indirectas (alcance 3), evalúan infraestructuras de servicio y centro de datos (Ayuso, 2020; GHG Protocol, 2017).

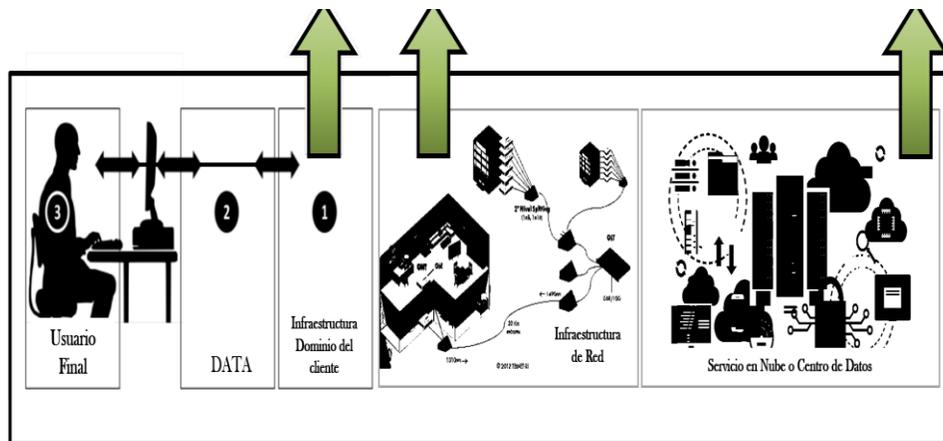


Figura 2. Esquema delimitante del cálculo de la huella de carbono.

En base a esto, Jackson y Hodgkinson (2023a) proponen la escalera de carbono de datos, para la estimación del alcance 1, un proceso secuencial para diagnosticar el impacto en una organización. Este modelo mide las emisiones por fases del ACV de los datos, adquisición, uso y almacenaje, a través de métricas específicas. Para adquisición de datos, emisiones por transferencia o almacenamiento asociado en dióxido de carbono equivalente por gigabyte ($\text{CO}_2\text{e}/\text{Gb}$).

Para velocidad de datos, tasa de crecimiento diario y energía asociada; almacenamiento con respecto al consumo según la ubicación (nube, local) y respecto al procesado y análisis, emisiones por unidad de procesamiento central-hora (CPU-hora). Aunque la presentación y visualización de resultados son parte del proceso, no se toman en cuenta para el cálculo final debido a su alta variabilidad.

La creación de los datos, dadas las condiciones de una industria con una progresiva transformación digital, infiere un consumo de kilovatio-hora (kWh) alto en virtud de la cantidad de datos generados, tanto por los empleados como por los diferentes sistemas, equipos, software, entre otros. Estos pueden importarse, copiarse, consultarse al *host* de forma local o remota, además ser integrados y actualizados con otro conjunto

de datos. El proceso en el *host* local y la actualización generan costo energético, mientras que la consulta remota no genera gasto para el cálculo de los alcances 1 y 2, ya que corresponde al alcance 3, relacionado con los centros de datos.

El almacenamiento puede ser realizado en el *host* (sin generar gasto), en la nube o de forma local en servidores (generadores de gasto energético). A nivel de centro de datos, no sólo consumen electricidad sino en ocasiones agua para su sistema de refrigeración (García, 2024). Las estimaciones se aproximan en función del tamaño de los datos a procesar y el nivel de análisis asociado, por ejemplo, un computador personal puede consumir un promedio de 200W/hora (sólo CPU) (Energuide.be, s.f; ENRE, s.f), en jornadas laborales de ocho (8) horas diarias, equivalente a 1,6kWh/día.

El modelado del cálculo de la huella de carbono, se ejemplifica con el análisis de una empresa con cincuenta (50) empleados, la cual puede generar un aproximado de 2.295 GB por día, lo que representa 12.82 t CO_2eq anuales (Digitaldecarb, s. f). La estimación de la huella de carbono realizada, como ejemplificación, refleja un esquema general del ACV del dato y su impacto, en el cual se toman en cuenta: alcance 1, emisiones por

transferencia y almacenamiento de datos (cantidad de datos), el ejemplo de la empresa de 50 empleados descrito (12,82 tCO₂e, para transferencia y almacenamiento).

El alcance 2, consumo energético por infraestructura de red en el dominio del cliente (10789 tCO₂e) y alcance 3, consumo de la infraestructura de red, plataforma de servicio (2495 tCO₂e) y gasto por alquiler de espacio en centro de dato (5000 tCO₂e), para un total estimado de gasto anual de 18296.82 tCO₂e, datos extraídos de las tablas de resumen e inventario de GEI del servicio MPLS por etapas e ciclo de vida y elementos de red de GHG Protocol (2017). Las emisiones producto del dato, representan el cero coma cero por ciento (0,07%) del total, siendo la infraestructura en el dominio del cliente, la que representa más de la mitad de la emisión.

En este orden de ideas, Makonin *et al.* (2022) exponen que la mayor parte del consumo de electricidad es invisible para los consumidores, por lo que la huella energética de los usuarios finales sigue siendo total, por lo que estas emisiones indirectas están fuera del alcance del cálculo, en algunos casos. Se estima que cerca de 90 mil millones de kWh al año es consumida por los centros de datos, responsables del uno por ciento (1%) al cinco por ciento (5%) de las emisiones globales de

gases invernadero (Datacenter Dynamics, 2024), utilizando grandes cantidades de agua que generan contaminación acústica (Dale *et al.*, 2023).

Freitag *et al.* (2021) y Jackson y Hodgkinson (2023a y 2023b), coinciden en que existe una desconexión entre el volumen de datos y la estimación de las emisiones, debido a que no es medible la cantidad de datos almacenados y olvidados en las industrias (datos oscuros), a esto se le suman las omisiones en relación al crecimiento del sector.

Otro aspecto es la inelasticidad energética, ya que las redes y los centros de datos operan independientemente del trabajo 24/7 (Makonin *et al.*, 2022); otros estudios, ignoran las emisiones de cadena de suministros, como la extracción de metales raros, fabricación de hardware, entre otros aspectos (Freitag *et al.*, 2021)

Otro enfoque particularmente relevante, es la economía circular, que propicia una perspectiva donde los productos, materiales y recursos se mantienen en uso el mayor tiempo posible, extrayendo al máximo su valor, minimizando los residuos al final del ciclo de vida (Marcelino-Aranda *et al.*, 2022; Turrión, 2023). La economía circular tiene tres (3) principios clave: eliminar residuos y contaminación, mantener materiales y

productos en uso, y regenerar sistemas naturales (Turrión, 2023).

Toma en cuenta acciones de rediseño tecnológico y gestión proactiva del conocimiento (Ellen MacArthur Foundation, 2015), optimización e infraestructura mediante reutilización, reparación y reciclaje (Marcelino-Aranda *et al.*, 2022) y reducción de datos oscuros (Jackson y Hodgkinson;

2023b), así como la sensibilización sobre la utilización y reutilización del conocimiento y los datos en las tareas diarias en las organizaciones. En virtud de lo expuesto, es imperante incorporar alternativas y estrategias para la mitigación basadas en la economía circular. Las estrategias propuestas que se desligan del análisis se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Estrategias de Economía Circular propuestas en relación al impacto de los datos

Fase/Ámbito	Estrategia clave	Acción concreta	Impacto ambiental (Reduce)
Generación de datos	Optimización algorítmica	Diseño de software eficiente y compresión de datos	Consumo energía CPU
	Migración sostenible	Traslado a centro de datos con energías renovables	Emisiones Alcance 3
Almacenamiento	Reducción de datos oscuros	Auditorías automatizadas y eliminación de redundancias	Espacio almacenamiento
	Almacenamiento jerárquico	Datos críticos en medios rápidos; históricos en almacenamiento frío	Energía refrigeración
Procesamiento	Descentralización	<i>Edge computing</i> en dispositivos IoT	Transmisión datos
	Virtualización	Consolidación de servidores físicos en entornos virtuales	Hardware requerido
Fin de vida	<i>Refurbishment</i>	Reacondicionamiento de discos duros/servidores	Vida útil hardware
	Reciclaje selectivo	Recuperación de metales de componentes electrónicos	Residuos tóxicos

Fuente: Elaboración propia a partir de (GHG Protocol, 2017; Jackson y Hodgkinson, 2023b; Nair, 2023; Nair, 2024).

Complementado el Cuadro 1, a nivel infraestructura, destacan dos (2) estrategias: la implementación de sistemas de enfriamiento en centros de datos mediante el reciclaje del calor residual y el diseño modular con ecodiseño en telecomunicaciones.

Para finalizar, se propone el fomento de una gestión circular integrada a través del monitoreo en tiempo real de la huella de carbono a nivel global en la organización, que logre una reducción sostenida de emisiones anuales. Las estrategias propuestas contribuyen directamente con cinco (5) ODS de la Agenda 2030. El ODS 7 (energía asequible y no contaminante) mediante la optimización de procesos y uso de energía renovable en centro de datos; el ODS 9 (industria, innovación e infraestructura) se alinea con el ecodiseño de infraestructuras y sustitución de materiales reciclables; los ODS 11(Ciudades y comunidades sostenibles) y 12 (producción y consumo responsables) con el reciclaje de metales críticos y la gestión circular de hardware; y el ODS 13 (Acción por el clima) mediante eficiencia en redes y transporte de datos.

4. Conclusiones

La gestión de datos en la era digital genera un impacto ambiental creciente, debido a las enormes cantidades de energía y

recursos que estos demandan durante su ACV, contribuye al agotamiento de recursos y a la emisión de gases de efecto invernadero.

Esta huella no solo es el resultado del consumo energético, sino también del impacto ambiental de la fabricación, operación y eliminación de los equipos utilizados en el almacenamiento y transmisión de datos.

Al considerar no solo el uso de electricidad en el procesamiento local de los datos, la infraestructura de telecomunicaciones y centros de datos, sino también la producción de equipos, el enfriamiento de los sistemas, y el reciclaje o disposición final de los desechos electrónicos, se pueden identificar de manera precisa las áreas con mayor impacto y así establecer prioridades para la mejora.

La economía circular ofrece una solución para mitigar el impacto, implementando prácticas como la optimización de la eficiencia energética, la reutilización de equipos y componentes y, la gestión inteligente de datos, estrategias que pueden contribuir significativamente a la reducción del impacto ambiental.

Este enfoque no solo beneficia al medio ambiente, sino que también promueve la creación de infraestructuras más resilientes, sostenibles y económicamente rentables, al

tiempo que se favorece una transición hacia un modelo más circular y sostenible en el sector digital.

Estas acciones, alineadas estratégicamente con ODS, no solo tienen un impacto ambiental positivo, sino que también representan una oportunidad para la innovación y el ahorro a largo plazo, contribuyendo a una transición hacia un futuro más sostenible en el que los recursos se gestionen de manera más eficiente y responsable.

Reducir la infraestructura física y mejorar la eficiencia de los procesos computacionales contribuye directamente a la reducción de emisiones de CO₂, especialmente si la nube o los centros de datos utilizados emplean energías renovables.

La consolidación de infraestructuras y el uso compartido de recursos (como los centros de datos) promueven el reciclaje de equipos y la reducción de residuos electrónicos, lo cual favorece la economía circular.

Referencias

Ávila-Guerrero, F., Bernal, I. y Monroy, S (2023). Transformación digital empresarial. Revisión de producciones investigativas 2017-2021. *Revista Venezolana de Gerencia*, 28(101), pp 282-296.

<https://doi.org/10.52080/rvgluz.28.101.18>

Ayuso, S. (2020). ¿Cómo contabilizar el impacto ambiental de las empresas? El caso de las emisiones de gases de efecto invernadero. *Revista de Estudios Empresariales*. Segunda época, 2, pp. 94-111. <https://doi.org/10.17561/ree.v2020n2.6>

Barone, O. (2022). Los datos, ¿son el nuevo “petróleo”? *Forbes Argentina*. <https://www.forbesargentina.com/columnistas/los-datos-son-nuevo-petroleo-n24113>

Castañeda, D. (2022). La nube contaminante. Un análisis socioambiental de la huella de carbono digital. *Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad*, 12(22). <http://dx.doi.org/10.32870/Pk.a12n22.730>

Dale, C., Selvaraji, E. y Yang, C. (13 de diciembre de 2023). Push to green data centres as they guzzle more power amid growing digital demands. <https://www.channelnewsasia.com/singapore/push-green-data-centres-they-guzzle->

- more-power-amid-growing-digital-demands-3982966
- DAMA International. (2017). DAMA.DMBOK. Guía del conocimiento para la gestión de datos. Technics Publications. https://www.google.co.ve/books/edition/DAMA_DMBOKGu%C3%ADa_Del_Conocimiento_Para_L/5fnvDwAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=inauthor:%22DAMA+International%22&printsec=frontcover
- DatacenterDynamics (28 de mayo de 2024). El reto energético de los data centers. <https://www.datacenterdynamics.com/es/noticias/el-reto-energetico-de-los-data-centers/#:~:text=Otro%20enfoque%20importante%20es%20la,un%20futuro%20digital%20m%C3%A1s%20sostenible.>
- Delgado, T. (2021). Industria 4.0 mínima viable: Bases legales, teórico-metodológicas y marco conceptual. Monografías Cujae 2021. www.researchgate.net/profile/Tatiana-Delgado-Fernandez/publication/356222261_Industria_40_Minima_Viable_Bases_legales_teorico-metodologicas_y_marco_conceptual/links/6192c08fd7d1af224bf21759/Industria-40-Minima-Viable-Bases-legales-teorico-metodologicas-y-marco-conceptual.pdf
- Digitaldecarb (s.f). CO2 Data Calculator. https://digitaldecarb.org/calc_it.html
- Ellen Macarthur Foundation. (2015). Towards a circular economy: business rationale for an accelerated transition. https://emf.thirdlight.com/file/24/_A-BkCs_h7gfln_Amlg_JKe2t9/Towards%20a%20circular%20economy%3A%20Business%20rationale%20for%20an%20accelerated%20transition.pdf
- Energuguide.be (s.f). How much power does a computer use? And how much CO2 does that represent? <https://www.energuguide.be/en/questions-answers/how-much-power-does-a-computer-use-and-how-much-co2-does-that-represent/54/>
- ENRE (s.f). Consumo básico de electrodomésticos. Argentina.gob.ar. <https://www.argentina.gob.ar/enre/uso-eficiente-y-seguro/consumo-basico-electrodomesticos>
- Factor CO2 (2020). Protocolo para el cálculo de la huella de carbono.

- https://intemares.es/sites/default/files/protocolo_calculo_huella_carbono_intemares_0.pdf
- Freitag, C.; Berners-Lee, M.; Widdicks, K.; Knowles, B.; Iain, G. y Friday, A. (2021). The real climate and transformative impact of ICT: a critique of estimates, trends and regulations. *Patters*, 2(9). <https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100340>
- García, C. (11 de julio de 2024). El impacto ambiental de los data centers. *El Tercer Planeta*. <https://eltercerplaneta.com/el-impacto-ambiental-de-los-data-centers/9479/#:~:text=Los%20centros%20de%20datos%20tambi%C3%A9n,actualizaci%C3%B3n%20del%20centro%20de%20datos.>
- GHG Protocol. (2017). ICT Sector guidance built on the GHG Protocol product life cycle accounting and reporting standard. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/GHGP-ICTSG%20-%20ALL%20Chapters.pdf>
- Hussain, S., Peristeras, V. y Magnisalis, I. (2021). DaLIF: a data lifecycle framework for data-driven governments. *Journal of Big Data*, 8(89). <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00481-3>
- IBM (2013) Wrangling big data: Fundamentals of data lifecycle management. <https://docplayer.net/4632594-Ibm-software-wrangling-big-data-fundamentals-of-data-lifecycle-management.html>
- ISO 14040 (2006). Gestión ambiental- Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Ivanov, D (2023). The industry 5.0 framework: viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives. *International Journal of Production Research*, 61(5), pp. 1683-1695. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2118892>
- Jackson, T. y Hodgkinson, I. (2023a). Is there a role for knowledge management in saving the planet from too much data?. *Knowledge Management Research & Practice*, 21(3), pp. 427-435. <https://doi.org/10.1080/14778238.2023.2192580>

- Jackson, T. y Hodgkinson, I. (2023b). Keeping a lower profile: how firms can reduce their digital carbon footprint. *Journal of Business Strategy*, 44(6), pp. 363-370. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/jbs-03-2022-0048/full/pdf?title=keeping-a-lower-profile-how-firms-can-reduce-their-digital-carbon-footprints>
- Makonin, S., Marks, L., Przedpelski, R., Rodriguez-Silva, A. y ElMallah, R. (2022). Calculating the carbon footprint of streaming media: beyond the myth of efficiency. *LIMITS'22, Virtually Held*. <https://computingwithinlimits.org/2022/papers/limits22-final-Makonin.pdf>
- Marcelino-Aranda, M, Alcibar, A., Martínez-Rodríguez, M. y Camacho, A. (2022). La economía circular como alternativa hacia un nuevo modelo para la actividad industrial sustentable. *Tecnología en Marcha*, 35(3), pp. 195-206. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5599>
- Nair, S. (2023). The Green Revolution of Cloud Computing: Harnessing Resource sharing, scalability, and energy-efficient data center practices. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2(11), pp. 69 – 76. <http://dx.doi.org/10.17148/IJARCCE.2023.121110>
- Nair, S. (2024). Challenges and concerns related to the environmental impact of cloud computing and the carbon footprint of data transmission. *Journal of Computer Science and Technology Studies*, 6(1), pp. 195 – 199. <http://dx.doi.org/10.32996/jcsts.2024.6.1.21>
- The Shift Project (2024). *Energie & Climat. Quels mondes virtuels pour quel monde reel? Rapport Final*. <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2024/03/The-Shift-Project-Quels-mondes-virtuels-pour-quel-monde-reel-Rapport-final-2024.pdf>
- Trujillo, G., Rodríguez, L., Mejía, A. y López, R. (2022). Transformación digital en América Latina: Una revisión sistémica. *Revista Venezolana de Gerencia*, 27(100), pp. 1519-1536. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.27.10.015>

Turrión, P. (2023). La economía circular en América Latina y el Caribe. Cambios de paradigma que introduce la economía circular en la generación de conocimiento en América Latina y el Caribe. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). Embajada de España en Guatemala. <https://interconecta.aecid.es/Gestin%20del%20conocimiento/La%20econom%C3%ADa%20circular%20en%20Am%C3%A9rica%20Latina%20y%20el%20Caribe.pdf>

UNIR (2024). El ciclo de vida del dato: qué es y qué fases comprende. UNIR Revista.

<https://www.unir.net/revista/empresa/ciclo-vida-dato/>

Yébenes, J. (2022) Marco para la construcción de sistemas de gobernanza de datos en entornos de Industria 4.0. Tesis doctoral para optar al título de Doctor en Ciencia y Tecnología. Universidad de Cantabria.

<http://dl.handle.net/10902/25087>