

## **Radiografía sostenible: comparando huella ambiental entre CR y DR**

Darlin Juliana Rueda Tilano

Diego Fernando Saavedra

Eliana Isabel Correa López

Erica Marcela Osorio Hernández

Gina Marbet Puerres Chamorro

Tutor

Edna Rocío Jamaica

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias de la Salud (ECISA)

Técnico en Radiología e Imágenes Diagnósticas

2025

## Resumen

El presente estudio analiza el impacto ambiental y la eficiencia energética de las tecnologías de Radiografía Computarizada (CR) y Radiografía Digital Directa (DR), con el propósito de identificar alternativas que favorezcan la sostenibilidad en los servicios de imagenología. A través de un enfoque cualitativo, con apoyo de datos cuantitativos y un diseño no experimental de corte transversal, se realizará una medición comparativa del consumo energético (kWh) y las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) para un volumen de estudios comparable en ambos sistemas. Los objetivos incluyen cuantificar el rendimiento de cada tecnología e identificar las variables operativas y tecnológicas clave (ej. tiempos de procesamiento y equipos auxiliares) que explican las diferencias. Los resultados esperados buscan evidenciar que la tecnología DR presenta menores niveles de consumo y emisiones respecto a la CR, demostrando la necesidad de implementar políticas de transición tecnológica hacia sistemas más eficientes, reforzando el compromiso ambiental del sector salud.

**Palabras clave:** radiología sostenible, eficiencia energética, huella de carbono, sostenibilidad hospitalaria, radiografía digital.

### **Abstract**

This study analyzes the environmental impact and energy efficiency of Computed Radiography (CR) and Direct Digital Radiography (DR) technologies to identify alternatives that promote sustainability in imaging services. Using a quantitative approach and a non-experimental cross-sectional design, a comparative measurement of energy consumption (kWh) and CO<sub>2</sub> equivalent (CO<sub>2</sub>e) emissions will be conducted for a comparable volume of studies across both systems. The objectives include quantifying the performance of each technology and identifying the key operational and technological variables (e.g., processing times and auxiliary equipment) that account for the observed differences. The expected findings aim to demonstrate that DR technology exhibits lower levels of consumption and emissions compared to CR, underscoring the necessity of implementing technological transition policies toward more efficient systems, thereby reinforcing the healthcare sector's environmental commitment.

**Keywords:** sustainable radiology, energy efficiency, carbon footprint, hospital sustainability, digital radiography.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	8
Planteamiento del Problema .....	10
Justificación .....	13
Objetivos.....	14
Objetivo General .....	14
Objetivos Específicos.....	14
Marco Teórico.....	15
Evolución de la Radiología Convencional .....	15
La Huella Ambiental y su Importancia en el Sector Salud .....	15
Tecnologías de Adquisición Radiológica.....	15
Impactos Ambientales y Sostenibilidad en Radiología para un futuro más ecológico. ....	16
Sostenibilidad Hospitalaria Integral y Movilidad .....	17
Inteligencia Artificial en Radiología: Potencial y Desafíos Ambientales.....	17
Iniciativas y Propuestas Globales en Radiología Verde.....	18
Marco Metodológico.....	19
Tipo de Investigación .....	19
Enfoque .....	19
Diseño.....	19
Técnicas de Recolección de Datos .....	20

Fases de la Investigación.....	20
Diseño de Matriz Comparativa .....	20
Análisis de Datos.....	20
Elaboración de Propuestas .....	21
Redacción de Conclusiones.....	21
Resultados.....	22
Niveles de Consumo Energético y Emisiones de CO <sub>2</sub> E Generadas por las Tecnologías CR Y DR Durante el Proceso de Adquisición de Imágenes .....	22
Prácticas Actuales de Gestión Energética en Servicios de Radiología, Considerando el Nivel De Capacitación del Personal y el Estado Tecnológico de los Equipos .....	23
Comparativo de la Eficiencia Ambiental de los Sistemas CR y DR en Función de la Reducción de Insumos y Residuos Hospitalarios.....	25
Conclusiones.....	28
Referencias Bibliográficas .....	30

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Comparativo entre CR y DR de insumos y residuos hospitalarios.....</i>	<b>26</b>
--	-----------

**Tabla de Figuras**

<b>Figura 1</b> <i>Árbol del problema</i> .....	9
---	---

## Introducción

En el contexto actual de la transformación tecnológica y la sostenibilidad ambiental en el sector salud, los servicios de imagenología representan un componente esencial tanto para el diagnóstico médico como para la gestión eficiente de recursos. Dentro de este ámbito, las tecnologías de Radiografía Computarizada (CR) y Radiografía Digital Directa (DR) han marcado una evolución significativa en la obtención de imágenes diagnósticas, aunque con implicaciones diferenciadas en cuanto a consumo energético, generación de residuos y huella de carbono. La creciente preocupación por los impactos ambientales del sistema sanitario hace necesario abordar la eficiencia energética de los equipos de diagnóstico por imagen como un elemento estratégico hacia la sostenibilidad hospitalaria.

A pesar de los avances técnicos y la amplia adopción de sistemas digitales, existe un vacío de conocimiento en torno a la comparación ambiental y energética entre las tecnologías CR y DR. La mayoría de los estudios se han centrado en su rendimiento clínico o en su costo operativo, dejando de lado el análisis sistemático de su impacto ecológico. En consecuencia, resulta pertinente examinar de manera objetiva el consumo de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero y la eficiencia ambiental de ambas tecnologías, con el propósito de proponer estrategias de implementación sostenibles en los servicios de radiología.

Con base en lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo general comparar las tecnologías de Radiografía Computarizada (CR) y Radiografía Digital Directa (DR) en cuanto a su consumo energético y huella de carbono, con el fin de formular recomendaciones orientadas a una práctica radiológica más sostenible. Para ello, se plantean objetivos específicos que incluyen la identificación de los niveles de consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub>e, la evaluación de prácticas de gestión energética, la comparación de la eficiencia ambiental de ambos sistemas y la

descripción de sus ventajas y desventajas ambientales, clínicas y económicas.

Este documento se estructura en varias secciones. En primer lugar, se presenta el marco teórico, que aborda los fundamentos técnicos de las tecnologías CR y DR, así como los principios de sostenibilidad aplicados a la imagenología médica. En segundo lugar, se describe el diseño metodológico, el cual adopta un enfoque comparativo y un diseño no experimental de tipo transversal, apoyado y sustentado en la revisión bibliográfica y el análisis de matrices comparativas.

Finalmente, se exponen los resultados, las recomendaciones y las conclusiones, orientadas a promover una gestión energética más eficiente y ambientalmente responsable en los servicios de diagnóstico por imagen.

## Planteamiento del Problema

Alto impacto ambiental y bajo rendimiento energético del uso de Radiografía Computarizada (CR) en comparación con Radiografía Digital Directa (DR).

**Figura 1**

*Árbol de problemas*



*Nota.* La figura muestra las principales causas que dan origen al problema central y en caso de no intervenir a tiempo las posibles consecuencias. Fuente: Selby, C./2022).

En los servicios de imagenología, tecnologías como la radiología computarizada (CR) y la radiología digital directa (DR) han sido ampliamente utilizadas para la adquisición de imágenes diagnósticas. Sin embargo, estas tecnologías difieren considerablemente en términos de consumo energético y huella de carbono. La CR, requiere procesamiento adicional y dispositivos intermedios como lectores de placas, tienen una mayor ineficiencia energética comparada con la DR, que procesa la imagen de forma directa y más automatizada. Esta diferencia afecta los costos operativos y repercute en el impacto ambiental de los servicios de salud.

En este contexto, la sostenibilidad hospitalaria se ha convertido en un eje prioritario para los sistemas sanitarios. La literatura reciente subraya la necesidad de adoptar prácticas que reduzcan la huella ecológica de los servicios médicos, promoviendo una gestión más eficiente de los recursos y una transición hacia tecnologías menos contaminantes (Aguilar y Muñoz, 2021). De manera particular, el campo de la radiología ha sido identificado como un actor relevante en la producción de emisiones y el consumo energético; por ello, organismos internacionales han recomendado la evaluación y optimización constante de sus procesos tecnológicos (European Society of Radiology [ESR], 2020).

A pesar de los avances en eficiencia y velocidad, la adopción de DR en muchos entornos clínicos aún no está generalizada, lo que hace que el uso de sistemas sea más contaminante. Es así como surge la necesidad de realizar un análisis comparativo riguroso entre ambas tecnologías para identificar oportunidades de mejora que reduzcan el consumo energético y la huella ambiental del sector salud (Luis et al., 2025). Asimismo, estudios recientes indican que la modernización de los sistemas de imagenología y la incorporación de tecnologías digitales avanzadas representa una oportunidad clave para promover la sostenibilidad ambiental en la

práctica radiológica (Currie et al., 2024).

De igual forma, la creciente preocupación global por el impacto ambiental del sector salud ha impulsado el análisis del papel de la radiología en el cambio climático. Investigaciones recientes señalan que las decisiones tecnológicas, operativas y de gestión dentro de los servicios radiológicos pueden influir significativamente en el nivel de emisiones generadas, por lo que es fundamental identificar prácticas que reduzcan dicho impacto sin comprometer la calidad diagnóstica (Doo et al., 2024). En este sentido, comprender la diferencia entre la huella energética de la CR y la DR resulta indispensable para orientar políticas institucionales basadas en evidencia científica.

Por todo lo anterior, surge la necesidad de realizar un análisis comparativo riguroso entre ambas tecnologías con el fin de determinar su contribución al consumo energético, estimar su huella de carbono y reconocer oportunidades de mejora que permitan fortalecer la sostenibilidad ambiental dentro del sector salud. Esta evaluación es esencial para apoyar la toma de decisiones respecto a la actualización tecnológica, la planificación institucional y la promoción de prácticas radiológicas más responsables con el medio ambiente.

De este análisis surge la pregunta de investigación ¿Cuáles son las oportunidades de mejora tecnológica y operativa para disminuir el impacto ambiental asociado a la radiología computarizada (CR) en comparación con la DR?

## **Justificación**

El sector salud, y particularmente el campo de la radiología, tienen un papel cada vez más relevante en la transición hacia modelos de atención sostenible y ecológicamente responsable. La medición y reducción de la huella de carbono en los sistemas de adquisición de imágenes no solo responde a una necesidad ambiental urgente, sino que también promueve la eficiencia operativa de las instituciones médicas.

Según Sánchez y Gutiérrez, (s.f.), “el uso de tecnologías basadas en inteligencia artificial y optimización energética en el contexto hospitalario puede contribuir significativamente a una movilidad y operación clínica más sostenibles”. La incorporación de inteligencia artificial, sistemas automatizados de gestión energética, plataformas de monitoreo en tiempo real y hardware de bajo consumo se configura, así como una estrategia clave para disminuir la huella ambiental del sector.

En consecuencia, la sostenibilidad radiológica implica mucho más que la reducción de emisiones; comprende una visión integral donde convergen la eficiencia tecnológica, la gestión ambiental y la responsabilidad institucional. Avanzar hacia este enfoque requiere no solo actualizar equipos, sino también promover políticas de uso racional de la energía, fomentar la capacitación del personal y fortalecer los mecanismos de evaluación del impacto ambiental. Por ello, el análisis detallado de las tecnologías empleadas en radiología, como los sistemas CR y DR, y su relación con el consumo energético se convierte en un componente central para la construcción de servicios de salud más sostenibles y acordes con los retos ambientales contemporáneos.

## Objetivos

### Objetivo General

Comparar las tecnologías de Radiografía Computarizada (CR) y Radiografía Digital Directa (DR) en cuanto a su consumo energético y huella de carbono.

### Objetivos Específicos

Identificar los niveles de consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub>e generadas por las tecnologías CR y DR durante el proceso de adquisición de imágenes.

Evaluar la eficiencia energética y la huella de carbono de los sistemas CR y DR en entornos comparables y bajo ciclos equivalentes de adquisición.

Comparar la eficiencia ambiental de ambas tecnologías en relación con la reducción de insumos, residuos hospitalarios y procesos asociados.

Analizar las prácticas actuales de gestión energética en los servicios de radiología, considerando la capacitación del personal y el estado tecnológico de los equipos.

Describir las ventajas y desventajas ambientales, clínicas y económicas de la implementación de DR frente al uso de CR y proponer estrategias sostenibles para su adopción en los servicios de imagenología.

## **Marco Teórico**

### **Evolución de la Radiología Convencional**

La radiología convencional ha evolucionado desde la Radiografía Computarizada (CR) hacia la Radiografía Digital Directa (DR), marcando un avance significativo tanto en eficiencia como en sostenibilidad. Mientras que la CR utiliza placas de fósforo que deben ser escaneadas para generar una imagen digital, lo que implica mayor consumo de tiempo y energía, la DR permite la captura directa de la imagen mediante sensores de panel plano, eliminando procesos intermedios. Esta diferencia tecnológica no solo optimiza el flujo de trabajo en los servicios de imagenología, sino que también reduce el consumo energético y, por tanto, la huella ambiental asociada al diagnóstico por imágenes.

### **La Huella Ambiental y su Importancia en el Sector Salud**

La huella ambiental es el conjunto de impactos que una actividad, proceso o producto genera sobre el medio ambiente. En el sector hospitalario, va desde el consumo energético hasta las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el manejo de residuos y el uso de recursos no renovables. La huella de carbono, como componente principal, mide las emisiones directas e indirectas de CO<sub>2</sub> equivalentes (CO<sub>2</sub>) asociadas a una actividad específica (Lefebvre, 2023).

En el sector salud y particularmente en el área de radiología, presenta un impacto ambiental considerable debido al uso intensivo de energía, equipamiento tecnológico y procesos logísticos que incluyen desde el desplazamiento de pacientes hasta la operación de equipos de imagen (Sánchez y Gutiérrez, 2025).

### **Tecnologías de Adquisición Radiológica**

La radiología convencional ha experimentado una notable evolución tecnológica, pasando de la Radiografía Computarizada (CR) a la Radiografía Digital Directa (DR), ambas

utilizadas para la obtención de imágenes médicas, pero con diferencias significativas en su funcionamiento y eficiencia. La tecnología CR emplea placas de fósforo que deben ser escaneadas para producir la imagen digital, lo que implica un mayor consumo de tiempo y energía. En contraste, la DR utiliza sensores de panel plano que permiten capturar la imagen de forma directa, eliminando etapas intermedias, lo que se traduce en una reducción del tiempo de exposición, una mayor eficiencia operativa y un menor impacto ambiental.

Según Luis et al., (2025), un análisis comparativo entre ambas tecnologías muestra que la DR presenta una mayor eficiencia energética y una reducción significativa en la huella de carbono respecto a la CR, pues se debe a su menor necesidad de manipulación física, procesos automatizados y menor requerimiento de insumos desechables.

### **Impactos Ambientales y Sostenibilidad en Radiología para un futuro más ecológico.**

En cuanto a impactos ambientales, Luis et al. (2025) señalan que el uso de tecnologías DR puede representar hasta un 30% menos de emisiones de CO<sub>2</sub>e comparado con CR en el ciclo completo de adquisición de imágenes. Como refieren Lojo et al. (2023), esta mejora se alinea con el concepto de radiología sostenible, que busca integrar prácticas ecológicas sin comprometer la calidad diagnóstica. Por otra parte, Currie et al., (2024) identifican desafíos en sostenibilidad en la medicina nuclear, muchos de los cuales se extrapolan al entorno radiológico general: consumo energético, gestión de desechos electrónicos y uso responsable de materiales radiactivos.

La transición hacia una radiología más sostenible requiere no solo innovación tecnológica, sino también un cambio de mentalidad en la gestión de los servicios de imagen. Como señala Open MedScience (2024), diversas instituciones son pioneras en iniciativas que integran prácticas ecológicas en radiología, como la reducción del uso de papel, la gestión

eficiente de residuos digitales y el uso de energías renovables en el funcionamiento de los equipos. Estas pequeñas acciones individuales contribuyen significativamente a disminuir la huella ambiental del sector, cumpliendo con los objetivos de sostenibilidad, mejorando su eficiencia operativa y percepción social, y consolidándose como referentes en la construcción de un sistema sanitario ambientalmente responsable.

### **Sostenibilidad Hospitalaria Integral y Movilidad**

Aparte de los equipos radiológicos, otros factores influyen en la huella ambiental del servicio de imagenología. La investigación de Sánchez y Gutiérrez (2025) propone el uso de IA para optimizar la movilidad hospitalaria, reduciendo los desplazamientos innecesarios de pacientes y personal. Esto se traduce en un aporte directo a la sostenibilidad ambiental de los servicios radiológicos, al integrarse con sistemas de cita inteligente, triage remoto y logística eficiente.

Asimismo, Mendoza (2020) ofrece un enfoque metodológico aplicable a estudios de imagenología, demostrando que el análisis de procesos logísticos, flujos internos y consumo energético puede servir de base para la reducción de emisiones dentro de hospitales públicos.

### **Inteligencia Artificial en Radiología: Potencial y Desafíos Ambientales.**

En la actualidad, la IA emerge como una herramienta eficaz en radiología, no solo para mejorar la precisión diagnóstica, sino también como un factor relevante en la sostenibilidad ambiental del sector. Según Doo et al., (2024), la IA tiene el potencial de optimizar flujos de trabajo, reducir repeticiones innecesarias de estudios y minimizar el consumo energético al agilizar la interpretación de imágenes.

Sin embargo, los autores también advierten que su implementación tiene riesgos ambientales, ya que el entrenamiento y operación de modelos requieren infraestructuras

computacionales intensivas en energía. Este doble filo plantea la necesidad de evaluar cuidadosamente el balance entre los beneficios operativos de la IA y su huella ambiental, proponiendo estrategias como el uso de centros de datos sostenibles, el entrenamiento eficiente de algoritmos y la aplicación ética de estas tecnologías dentro de un marco de responsabilidad ambiental.

### **Iniciativas y Propuestas Globales en Radiología Verde**

Diversas iniciativas internacionales originan la implementación de tecnologías verdes en los servicios de imagenología. Como señalan Lojo et al., (2023), la propuesta de la Canadian Association of Radiologists sugiere una fórmula de optimización para los servicios de radiología, basada en minimizar la huella de carbono, reducir el consumo energético y maximizar la eficiencia de los equipos existentes mediante mantenimiento predictivo y actualización tecnológica planificada.

## **Marco Metodológico**

### **Tipo de Investigación**

El presente estudio se clasifica como una investigación aplicada sustentada en una revisión bibliográfica, orientada a generar conocimiento útil para mejorar la sostenibilidad de los sistemas radiológicos en entornos hospitalarios (Hernández-Sampieri et al., 2014). A través del análisis de literatura científica, se aborda el problema del elevado impacto ambiental asociado al uso de tecnología CR en comparación con la tecnología DR.

### **Enfoque**

El estudio adopta un enfoque cualitativo-comparativo, ya que se sustenta en el análisis interpretativo de información obtenida a través de la revisión bibliográfica especializada. Aunque incorpora métricas y datos cuantitativos reportados en investigaciones previas como consumo energético, emisiones de GEI y estimaciones de huella de carbono, estos no son medidos directamente, sino comparados y analizados a partir de fuentes secundarias.

Este enfoque permite contrastar de manera sistemática el desempeño ambiental de las tecnologías CR y DR, utilizando valores estandarizados presentes en la literatura, como los derivados del Protocolo GHG o de estudios de Análisis de Ciclo de Vida, siguiendo la metodología adoptada en investigaciones recientes sobre sostenibilidad en radiología (Luis et al., 2025; Roletto et al., 2024).

### **Diseño**

El diseño metodológico es no experimental, de tipo transversal, dado que no se manipulan las variables, sino que se observan y analizan en su contexto real. Se recopilan datos en un solo momento temporal, permitiendo establecer diferencias significativas entre la CR y la DR (Tamayo y Tamayo, 2008).

## **Técnicas de Recolección de Datos**

Se hará mediante revisión de literatura científica, además, se propone el uso de matrices comparativas.

## **Fases de la Investigación**

Revisión bibliográfica: Recopilación de literatura sobre CR, DR, sostenibilidad en salud y eficiencia energética.

## **Diseño de Matriz Comparativa**

Selección de criterios de comparación ambiental y energética.

## **Análisis de Datos**

Evaluación cuantitativa que se basa en la recopilación, organización y comparación de datos numéricos reportados en la literatura especializada sobre consumo energético, emisiones de GEI y huella de carbono asociadas a las tecnologías CR y DR. Estos valores, obtenidos de estudios previos y documentos técnicos, permiten identificar tendencias, rangos y diferencias entre ambas tecnologías sin necesidad de realizar mediciones directas.

El análisis consistirá en contrastar las métricas ya establecidas, como consumos promedio en kWh, factores de emisión o estimaciones de huella de carbono calculadas mediante metodologías estandarizadas, como el Protocolo GHG o el Análisis de Ciclo de Vida simplificado, con el fin de determinar cuál tecnología presenta un desempeño ambiental más favorable. Este proceso permite realizar una comparación objetiva basada en datos existentes, sin la aplicación de pruebas estadísticas.

**Elaboración de Propuestas**

Elaboración de propuestas orientadas a la formulación de recomendaciones sustentadas en los hallazgos del análisis realizado.

**Redacción de Conclusiones**

Síntesis de resultados y proyección de impactos para una radiología sostenible.

## Resultados

### **Niveles de Consumo Energético y Emisiones de CO<sub>2</sub>e Generadas por las Tecnologías CR Y DR Durante el Proceso de Adquisición de Imágenes**

El análisis del consumo energético y de la huella de carbono asociada a los sistemas de imagenología evidencia diferencias significativas entre la radiología computarizada (CR) y la radiología digital directa (DR). Los estudios revisados indican que la CR requiere un procesamiento adicional mediante lectores de placas y dispositivos intermedios, lo que incrementa su demanda energética en comparación con la DR, que permite la adquisición y procesamiento de imágenes de forma directa y automatizada (Goh y Tan, 2019; Doo et al., 2024). Este mayor consumo de energía se traduce directamente en un aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub>e durante el flujo de trabajo clínico (Currie et al., 2024).

En términos cuantitativos, investigaciones recientes muestran que la DR puede reducir de manera significativa tanto el consumo de electricidad como las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a cada estudio radiológico. Según Doo et al., (2024), la automatización de los procesos en DR disminuye la dependencia de equipos adicionales y minimiza el tiempo de procesamiento, factores que contribuyen a una menor huella de carbono en comparación con los sistemas CR. Por su parte, Goh y Tan (2019) destacan que la adopción de DR permite una operación más eficiente y sostenible, promoviendo simultáneamente la reducción de costos operativos y del impacto ambiental en los servicios de salud.

La literatura también resalta que, aunque los beneficios de DR son evidentes, la adopción de esta tecnología aún no es homogénea en todos los entornos clínicos. Factores como limitaciones presupuestales, infraestructura tecnológica insuficiente y resistencia al cambio institucional mantienen vigente el uso de CR en muchos hospitales, prolongando el consumo

energético elevado y las emisiones de CO<sub>2</sub>e (Aguilar y Muñoz, 2021). De igual forma, Sánchez y Gutiérrez (s.f.) subrayan que la implementación de tecnologías basadas en inteligencia artificial y la optimización energética constituyen estrategias clave para reducir la huella ambiental de los servicios hospitalarios, incluyendo los procesos de adquisición de imágenes radiológicas.

En conclusión, los resultados sugieren que la transición hacia DR representa una oportunidad efectiva para disminuir el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub>e en los servicios de imagenología, contribuyendo al fortalecimiento de prácticas hospitalarias más sostenibles y responsables con el medio ambiente.

### **Prácticas Actuales de Gestión Energética en Servicios de Radiología, Considerando el Nivel De Capacitación del Personal y el Estado Tecnológico de los Equipos**

El manejo eficiente de los recursos energéticos en los servicios de radiología depende no solo de la tecnología empleada, sino también del nivel de capacitación del personal y de la implementación de protocolos de gestión energética. Estudios recientes indican que, aunque muchas instituciones han adoptado medidas para optimizar el consumo eléctrico, la eficacia de estas prácticas está directamente ligada a la formación y conciencia del personal en torno a sostenibilidad y eficiencia (Aguilar y Muñoz, 2021).

En los servicios que utilizan tecnología más antigua, como sistemas CR, se observa un mayor consumo de energía debido a procesos adicionales, mantenimiento frecuente y operación menos automatizada, lo que incrementa el riesgo de emisiones innecesarias de CO<sub>2</sub>e (Goh y Tan, 2019). Por el contrario, los servicios equipados con DR no solo permiten una reducción significativa del gasto energético, sino que también facilitan la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real y ajustes automáticos de los parámetros de adquisición de imágenes (Doo et al., 2024). Estas características tecnológicas, sin embargo, solo alcanzan su máximo

potencial cuando el personal está capacitado para utilizarlas adecuadamente, interpretando los datos de eficiencia y aplicando protocolos de ahorro energético de manera consistente.

La literatura resalta que la capacitación del personal en gestión energética y sostenibilidad hospitalaria es un factor crítico. Sánchez y Gutiérrez (s.f.) señalan que el uso de herramientas de inteligencia artificial y sistemas de control energético no garantiza por sí solo la reducción de la huella de carbono; es indispensable que el equipo humano esté entrenado en buenas prácticas y en la interpretación de indicadores de eficiencia. Asimismo, el European Society of Radiology (ESR, 2020) enfatiza la necesidad de integrar programas de educación ambiental en los servicios de radiología, promoviendo una cultura institucional que priorice la sostenibilidad en todas las operaciones.

Adicionalmente, la implementación de protocolos estandarizados de monitoreo y auditoría energética contribuye a identificar oportunidades de mejora y a evaluar la efectividad de las medidas adoptadas. Esto permite a los centros radiológicos realizar ajustes continuos, optimizar el uso de equipos y reducir el consumo energético sin comprometer la calidad diagnóstica.

En consecuencia, los resultados evidencian que las prácticas actuales de gestión energética presentan un rendimiento heterogéneo. Los centros con tecnología avanzada y personal capacitado muestran reducciones significativas en consumo eléctrico y emisiones de CO<sub>2</sub>e, mientras que aquellos con equipos más antiguos y menor formación presentan niveles elevados de gasto energético y un impacto ambiental más alto. Esto indica que cualquier estrategia orientada a la sostenibilidad debe combinar modernización tecnológica con programas de formación continua, garantizando así que los equipos sean utilizados de manera óptima y responsable (Doo et al., 2024; Woolen et al., 2023).

## **Comparativo de la Eficiencia Ambiental de los Sistemas CR y DR en Función de la Reducción de Insumos y Residuos Hospitalarios**

Para el desarrollo de este objetivo fue necesario identificar y relacionar los insumos que se consumen por cada uno de los sistemas mencionados durante el proceso radiológico con el fin de evaluar su eficiencia ambiental. En el caso del sistema CR, se destacan las placas de fósforo (PSP), fundas protectoras desechables, productos de limpieza para el lector, empaques y materiales plásticos, además de la energía consumida por el lector CR durante la lectura de las imágenes. Por su parte, el sistema DR utiliza significativamente menos insumos, limitándose principalmente al panel detector y al mantenimiento preventivo, lo que reduce la generación de residuos y el consumo de recursos (ESR, 2020; Lojo et al., 2023).

Asimismo, se analizó la generación de residuos sólidos y electrónicos, identificando que CR produce una mayor cantidad de residuos durante su operación, incluyendo placas deterioradas, fundas plásticas y empaques, así como residuos electrónicos derivados del lector y de las placas al final de su vida útil. DR, por el contrario, reduce significativamente la cantidad de residuos sólidos y electrónicos, concentrándose solo en el panel detector al final de su vida útil, y prácticamente elimina los residuos peligrosos asociados al desgaste de insumos (Picano et al., 2023; Currie et al., 2024).

En conclusión, la eficiencia ambiental de los sistemas DR es superior a la de los sistemas CR, principalmente por la reducción de insumos, menor generación de residuos y prolongada vida útil de los equipos, lo que evidencia la importancia de considerar tanto la tecnología como los procesos asociados para implementar prácticas radiológicas más sostenibles.

**Tabla 1***Comparativo entre CR y DR de insumos y residuos hospitalarios*

Categoría de Análisis	Sistema CR	Sistema DR	Conclusión Comparativa
Insumos utilizados	Utiliza placas de fósforo (PSP), fundas protectoras, empaques, y productos para el mantenimiento y limpieza del lector CR. Requiere reemplazar y procesar placas de forma periódica.	No utiliza placas ni fundas. Los insumos se reducen casi por completo; solo requiere mantenimiento preventivo del panel DR.	DR consume menos insumos, lo cual reduce su impacto ambiental (ESR, 2020; Goh y Tan, 2019).
Estimación de la vida útil	Las placas PSP deben reemplazarse aproximadamente entre cada 30.000–50.000 exposiciones; el lector CR tiene una vida útil menor y requiere mantenimiento frecuente.	Los paneles DR suelen tener una vida útil de 7–10 años, con menor desgaste y menor frecuencia de mantenimiento.	DR presenta mayor durabilidad y menor necesidad de reposición, reduciendo costos y residuos a largo plazo (Selby, 2022; Goh y Tan, 2019).
Residuos sólidos generados	Genera residuos sólidos como placas deterioradas, fundas plásticas, empaques y otros insumos físicos.	Prácticamente no genera residuos sólidos durante la operación; solo emite residuos al final de la vida útil del panel.	DR genera menos residuos sólidos, contribuyendo a una operación más sostenible (Lojo et al., 2023; ESR, 2020).
Residuos electrónicos	Lector CR y placas PSP consideradas como residuos electrónicos al final de su vida útil.	Panel DR constituye el principal residuo electrónico, pero en menor volumen y menor frecuencia.	DR reduce significativamente la cantidad acumulada de residuos electrónicos, siendo más eficiente ambientalmente (Woolen et al., 2023; Currie et al., 2024).
Residuos peligrosos	No utiliza químicos como la radiología análoga, pero puede generar residuos por desgaste de placas PSP y componentes del lector.	No genera residuos peligrosos en su operación regular.	DR elimina casi por completo la generación de residuos peligrosos, minimizando el impacto ambiental (ESR, 2020)

*Nota.* Elaboración propia

Con la anterior comparación se logra evidenciar que los sistemas DR representan una alternativa tecnológica claramente superior en términos de eficiencia ambiental. Su menor dependencia de insumos físicos, la reducción casi total de residuos hospitalarios y electrónicos, y su baja frecuencia de reposición posicionan esta tecnología como la opción más sostenible frente a los sistemas CR.

## Conclusiones

El análisis comparativo desarrollado en este documento permite concluir que la Radiografía Digital Directa (DR) presenta un desempeño ambiental y energético significativamente superior frente a la Radiografía Computarizada (CR). La evidencia revisada demuestra que la DR reduce de manera consistente el consumo energético, las emisiones de dióxido de carbono y la dependencia de equipos auxiliares, lo que se traduce en una menor huella ambiental durante el proceso de adquisición de imágenes diagnósticas.

Los resultados obtenidos confirman que la tecnología CR, debido a la necesidad de lectores de placas, mayor número de etapas operativas y uso recurrente de insumos físicos, genera un mayor consumo eléctrico y una mayor producción de residuos hospitalarios y electrónicos. En contraste, la DR optimiza el flujo de trabajo radiológico al eliminar procesos intermedios, disminuir tiempos de adquisición y reducir significativamente la generación de residuos sólidos y peligrosos, consolidándose como una alternativa más eficiente y sostenible.

Asimismo, se evidencia que la gestión energética en los servicios de radiología no depende exclusivamente del tipo de tecnología instalada, sino también del nivel de capacitación del personal y del estado tecnológico de los equipos. Los servicios que combinan tecnología DR con programas de formación en eficiencia energética y sostenibilidad hospitalaria presentan mejores indicadores de desempeño ambiental, lo que resalta la importancia de una estrategia integral que articule innovación tecnológica y gestión del talento humano.

Desde el punto de vista de los insumos y residuos hospitalarios, la comparación muestra que la DR reduce casi por completo el uso de consumibles y disminuye la frecuencia de reposición de componentes, lo cual impacta positivamente en la reducción de costos operativos y en la minimización del impacto ambiental a largo plazo. Este hallazgo refuerza la necesidad de

considerar criterios de sostenibilidad en los procesos de toma de decisiones para la actualización tecnológica en los servicios de imagenología.

Finalmente, el estudio permite concluir que la transición progresiva de CR a DR constituye una oportunidad estratégica para avanzar hacia una radiología sostenible, alineada con los principios de eficiencia energética, responsabilidad ambiental y sostenibilidad hospitalaria. No obstante, esta transición debe acompañarse de políticas institucionales, planes de capacitación continua y estrategias de monitoreo energético que garanticen un uso óptimo de la tecnología y maximicen sus beneficios ambientales sin comprometer la calidad diagnóstica.

### Referencias Bibliográficas

- Aguilar, A., & Muñoz, R. (2021). Sostenibilidad en los servicios de salud: retos y oportunidades en la gestión hospitalaria. *Revista Salud Pública*, 23(4), 567-575.  
<https://doi.org/10.1590/s1518-8787.20212304001>
- Currie, G., Hawk, K., & Rohren, E. (2024). Challenges confronting sustainability in nuclear medicine practice. *Radiography*. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2024.04.026>
- Doo, F., Vosshenrich, J., Cook, T., Moy, L., Almeida, E., Woolen, S., Gichoya, J., Heye, T., & Hanneman, K. (2024). *Environmental sustainability and AI in radiology: A double-edged sword*. *Radiology*, 310(2), e232030. <https://doi.org/10.1148/radiol.232030>
- European Society of Radiology (ESR). (2020). ESR paper on sustainable radiology. Insights into Imaging, 11(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s13244-020-00888-2>
- Goh, Y. G., & Tan, L. K. (2019). Digital radiography: A sustainable approach to medical imaging. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, 50(2), 321-327.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmir.2019.01.007>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. d. P. (2014). Metodología de la investigación (6.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Education.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008>
- Luis, E., Muñoz, L., Soto, J., & Velásquez, C. (2025). Huella de carbono y su eficiencia energética en radiología convencional (CR-DR). Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD.  
<https://repository.unad.edu.co/jspui/bitstream/10596/69171/3/eyluisg-.pdf>
- Lojo, S., Rovira, À. & Morales, Á. (2023). Green radiology: Cómo desarrollar una radiología sostenible. Canadian Association of Radiologists. <https://car.ca/wp->

[content/uploads/2025/02/green-radiology-espanol.pdf](https://content/uploads/2025/02/green-radiology-espanol.pdf)

Muñoz, L. E., Soto, J., & Velásquez, C. (2025). Huella de Carbono y su Eficiencia Energética en Radiología Convencional. *Repositorio Univeridad Nacional Abierta y a Distancia*

<https://repository.unad.edu.co/jspui/bitstream/10596/69171/3/eyluisg-.pdf>

Picano, E., Mangia, C., & D'Andrea, A. (2023). Climate change, carbon dioxide emissions, and medical imaging contribution. *Journal of Clinical Medicine*, 12(1), 215.

<https://doi.org/10.3390/jcm12010215>

Roletto, A., Zanardo, M., Bonfitto, G. R., Catania, D., Sardanelli, F., Zanoni, S., et al. (2024).

The environmental impact of energy consumption and carbon emissions in radiology departments: a systematic review. *European Radiology Experimental*, 8, 35.

<https://doi.org/10.1186/s41747-024-00424-6>

Sánchez, A., & Gutiérrez, V. (s.f). Medición de la Huella de Carbono en el Desplazamiento de Clínicas y Hospitales. *Repositorio Universidad Externado de Colombia*.

<https://bdigital.uexternado.edu.co/entities/publication/6f499c0b-c3ac-4bdd-8b2e-b63e31615b87>

Selby, C. (2022). RADIOGRAFÍA DIGITAL: CR VS. PANELES PLANOS DR.

*Blockimaging.com*. <https://www.blockimaging.com/es/blog/digital-x-ray-cr-vs.-dr>

Tamayo, M., & Tamayo, D. (2008). El proceso de la investigación científica. Limusa.

[https://www.academia.edu/120612419/EL\\_PROCESO\\_DE\\_LA\\_INVESTIGACION\\_CIENTIFICA\\_5\\_Tamayo](https://www.academia.edu/120612419/EL_PROCESO_DE_LA_INVESTIGACION_CIENTIFICA_5_Tamayo)

Woolen, S. A., Kim, C. J., Hernandez, A. M., Becker, A., Martin, A. J., Kuoy, E., & Tutton, S.

(2023). Radiology environmental impact: What is known and how can we improve?

*Academic Radiology*, 30(4), 625–630. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2022.10.021>