

**Obsolescencia tecnológica en tomografía computarizada: una revisión bibliográfica sobre
consumo energético, huella de carbono y costos operativos**

Carlos Andrés Castellanos Gómez

Erika Andrea Vargas Baca

Laura Marcela Rodríguez Torres

Pedro Alejandro Silva López

Sebastián Díaz García

Asesora

Edna Rocío Jamaica Guío.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de ciencias de la Salud ECISA

Tecnología en Radiología e Imágenes Diagnósticas

2026

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por guiarnos, brindarnos fortaleza y permitirnos culminar satisfactoriamente este proceso académico. Su acompañamiento fue fundamental para superar cada reto presentado durante el desarrollo de este trabajo.

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestras familias, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante a lo largo de nuestra formación profesional. Su respaldo fue esencial para alcanzar esta meta y mantenernos firmes en cada etapa del proceso.

De manera especial, agradecemos a nuestra tutora por su orientación, dedicación y valiosos aportes, los cuales fueron fundamentales para la construcción y desarrollo de este trabajo de grado. Su acompañamiento académico contribuyó significativamente al fortalecimiento de nuestros conocimientos y al cumplimiento de los objetivos propuestos.

Asimismo, agradecemos a la Universidad y a todos los docentes que hicieron parte de nuestra formación, por brindarnos las herramientas necesarias para nuestro crecimiento académico y profesional. También extendemos nuestro reconocimiento a las personas que, de una u otra forma, colaboraron y nos animaron durante este proceso.

Finalmente, agradecemos a cada uno de los integrantes del grupo por el compromiso, la responsabilidad y el esfuerzo compartido, elementos que hicieron posible la culminación exitosa de este trabajo.

Resumen

La investigación analiza el impacto del uso de tomógrafos computarizados obsoletos en términos de consumo energético, costos operativos y emisiones indirectas de CO₂. mediante una revisión literaria con enfoque cualitativo, donde se analizan fuentes científicas y técnicas relacionadas con la eficiencia energética en radiología, obsolescencia tecnológica y sostenibilidad hospitalaria. Los resultados de la revisión demuestran que los tomógrafos antiguos tienen una alta demanda eléctrica, mayor que los equipos de tecnología reciente, por la ausencia de sistemas de optimización, modos de bajo consumo y componentes de alta eficiencia, lo que aumenta los costos operacionales y contribuye al deterioro ambiental. Se concluye que la persistencia de estos equipos representa un problema económico y ambiental, y que la evidencia técnica respalda la necesidad de modernización tecnológica en los servicios de radiología.

Palabras Clave: eficiencia energética, tomografía computarizada, obsolescencia tecnológica, sostenibilidad, emisiones de CO₂.

Abstract

The research analyzes the impact of using outdated CT scanners in terms of energy consumption, operating costs, and indirect CO₂ emissions. Through a literature review with a qualitative approach, where scientific and technical sources on energy efficiency in radiology, technological obsolescence and hospital sustainability are analyzed. The results of the review show that old tomographs have a high electrical demand, higher than equipment of recent technology, due to the absence of optimization systems, low-power modes and high-efficiency components, which increases operational costs and contributes to environmental deterioration. It is concluded that the persistence of this equipment represents an economic and environmental problem, and that technical evidence supports the need for technological modernization in radiology services.

Keywords: energy efficiency, computed tomography, technological obsolescence, sustainability, CO₂ emissions.

Tabla de Contenido

Introducción	9
Planteamiento del Problema	11
Justificación	14
Objetivos	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos.....	17
Marco Teórico.....	18
Funcionamiento General de la Tomografía Computarizada	18
Antecedentes Históricos en Tomografía Computarizada.....	19
Obsolescencia Tecnológica y Gestión de Equipos en Radiología	20
Consumo Energético de los Tomógrafos CT	21
Emisiones de CO ₂ Asociadas al Uso de TC	22
Costos Operativos y Sostenibilidad Económica.....	23
Marcos Normativos y Lineamientos de Sostenibilidad	24
Tecnología Reciente y Ausencia de Beneficio Proporcional.....	25
Marco Metodológico.....	27
Fases del Desarrollo	27
<i>Fase 1. Delimitación y Búsqueda Literaria</i>	<i>27</i>
<i>Fase 2. Recolección, Clasificación y Análisis.....</i>	<i>28</i>
<i>Fase 3. Síntesis y Conclusiones.....</i>	<i>28</i>
Resultados	29
Consumo Energético y Desperdicio en TC.....	29

Emisiones de CO ₂ y Huella de Carbono	30
Costos Operativos y Ahorros Potenciales	31
Análisis Global Internacional.....	33
Conclusiones	35
Referencias Bibliográficas	36

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Comparación entre Tomógrafos Obsoletos y Modernos según Indicadores de Consumo, Impacto Ambiental y Costos Operativos.....</i>	32
Tabla 2 <i>Análisis Comparativo Internacional de la Obsolescencia Tecnológica en Tomografía Computarizada.....</i>	33

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Tomógrafos de Primera Generación</i>	20
---	----

Introducción

La tomografía computarizada constituye una de las herramientas diagnósticas más relevantes en los servicios de radiología, debido a su capacidad para generar imágenes de alta resolución en tiempos reducidos y contribuir al diagnóstico oportuno de diversas patologías. Su aplicación clínica se ha consolidado como un recurso indispensable en múltiples escenarios asistenciales; sin embargo, el desarrollo acelerado de esta tecnología ha favorecido la permanencia de equipos obsoletos en distintas instituciones de salud, especialmente en contextos donde las limitaciones presupuestales dificultan su renovación. Esta situación plantea retos importantes no solo en términos de actualización tecnológica, sino también en relación con la eficiencia energética, la sostenibilidad ambiental y los costos operativos asociados al funcionamiento continuo de estos dispositivos.

La obsolescencia tecnológica en tomografía computarizada se refleja en equipos que, pese a conservar su funcionalidad básica, presentan un desempeño inferior frente a sistemas más recientes. En general, estos equipos demandan mayores cantidades de energía eléctrica, carecen de mecanismos avanzados de optimización y pueden requerir mantenimientos más frecuentes, lo que incrementa el costo total de operación. Adicionalmente, su uso prolongado contribuye al aumento de emisiones indirectas de dióxido de carbono, derivadas del consumo energético necesario para su funcionamiento, lo cual convierte esta problemática en un asunto de interés tanto clínico como ambiental.

Desde esta perspectiva, la gestión tecnológica en salud debe contemplar no solo la continuidad del servicio y la calidad diagnóstica, sino también criterios de eficiencia, sostenibilidad y responsabilidad institucional. Comparar el impacto de tomógrafos obsoletos con el de equipos de tecnología reciente permite identificar diferencias significativas en consumo

energético, huella de carbono y costos operativos, ofreciendo una base objetiva para el análisis de la modernización tecnológica en radiología. Este enfoque resulta especialmente pertinente en un contexto en el que las instituciones de salud se encuentran llamadas a optimizar recursos y a adoptar prácticas alineadas con los principios de sostenibilidad y uso racional de la energía.

En consecuencia, el presente trabajo desarrolla una revisión bibliográfica orientada a analizar el impacto del uso de tomógrafos computarizados obsoletos frente a equipos de tecnología más reciente, considerando dimensiones energéticas, ambientales y económicas. A partir de la evidencia científica y técnica disponible, se busca aportar elementos de análisis que fortalezcan la toma de decisiones institucionales sobre renovación tecnológica, al tiempo que se promueven servicios de radiología más eficientes, sostenibles y acordes con las exigencias actuales del sistema de salud

Planteamiento del Problema

En los servicios de radiología, el uso de equipos de tomografía computarizada constituye un componente esencial para el diagnóstico oportuno y preciso de múltiples patologías. Sin embargo, en muchos hospitales e instituciones de salud persisten equipos de tomografía obsoletos con más de una década de funcionamiento, los cuales presentan un alto consumo energético debido a su tecnología obsoleta. Estos equipos demandan mayor potencia eléctrica para operar, generando sobrecarga en la infraestructura hospitalaria, incremento en el gasto energético y una mayor huella ambiental asociada al uso intensivo de electricidad.

Según Brown et al. (2022) los tomógrafos antiguos aumentan las emisiones indirectas de CO₂, subrayando la necesidad de estrategias de mitigación basadas en modernización tecnológica. De igual forma, García et al. (2025) señalan que los departamentos de radiología deben transitar hacia modelos sostenibles que contemplen la eficiencia energética como un criterio central en la toma de decisiones institucionales.

A diferencia de los tomógrafos de última generación que incorporan sistemas de optimización de energía, modos de suspensión y componentes más eficientes, los equipos antiguos carecen de mecanismos de gestión energética, lo que aumenta significativamente sus costos operativos sin aportar una mejora sustancial en la calidad diagnóstica. Esta problemática se agrava en instituciones públicas o de recursos limitados, donde la renovación tecnológica se posterga por restricciones presupuestales, perpetuando el uso de equipos ineficientes, costosos y ambientalmente insostenibles.

En Latinoamérica, autores como Garnica (2024) confirman que los equipos de generaciones anteriores no solo consumen más energía, sino que también carecen de mecanismos de gestión ambiental, generando mayor impacto ecológico sin mejorar la calidad diagnóstica.

También, los lineamientos internacionales como PNUMA (2003) enfatizan la importancia de tramitar adecuadamente los riesgos ambientales asociados a tecnologías obsoletas dentro de los servicios de salud. Por tanto, se identifica la necesidad de evaluar y cuantificar el impacto del consumo energético de los tomógrafos obsoletos, con el fin de generar evidencia técnica y económica que sustente decisiones institucionales hacia la renovación o modernización tecnológica en radiología.

No obstante, en muchas instituciones no existe un análisis sobre el impacto real que tienen los tomógrafos obsoletos en términos de consumo energético, huella de carbono y costos operativos. Esta falta de información limita la toma de decisiones basada en evidencia, retrasando la implementación de políticas de renovación tecnológica o estrategias de sostenibilidad institucional. Sin estudios que comparen concretamente el desempeño de equipos antiguos frente a los modernos, es difícil justificar las inversiones, estimar recursos financieros o proyectar reducciones en la huella ambiental. La ausencia de estos análisis limita la toma de decisiones basada en evidencia, dificultando la planeación estratégica, la justificación de inversiones y la implementación de políticas de sostenibilidad en radiología. Pabón et al. (2018) sostienen que la desactualización tecnológica afecta directamente el desempeño operativo y la eficiencia de los servicios diagnósticos, resaltando la importancia de contar con criterios técnicos y administrativos sólidos para la adquisición y renovación de equipos médicos.

Por ende, se identifica la necesidad de evaluar y cuantificar el impacto del consumo energético y las implicaciones ambientales y económicas asociadas al uso de tomógrafos obsoletos. El análisis de estos factores no solo permitirá dimensionar la problemática, sino también generar evidencia técnica y económica que sustente decisiones institucionales orientadas a la modernización y sostenibilidad del servicio de radiología, además de comprender cómo

influyen las tecnologías de adquisición de imágenes en la eficiencia operativa, el consumo energético y la gestión de calidad resulta fundamental para promover servicios de radiología sostenibles y alineados con los principios de optimización de recursos.

De este análisis surge la pregunta problema ¿Cuál es el impacto del uso de tomógrafos computarizados obsoletos en términos de consumo energético, huella de carbono y costos operativos dentro de los servicios de radiología, y cómo esta información puede orientar decisiones institucionales sobre renovación o modernización tecnológica?

Justificación

La presente investigación se justifica en la necesidad de analizar de manera crítica el impacto energético, ambiental y económico que genera el uso de tomógrafos computarizados obsoletos frente a equipos de tecnología más reciente, en un contexto donde la gestión eficiente de los recursos se ha convertido en un eje fundamental para la sostenibilidad de los servicios de salud. En las instituciones hospitalarias, especialmente en aquellas que operan con limitaciones presupuestales, la permanencia de equipos con más de diez años de uso representa no solo un reto técnico, sino también un problema de administración, calidad y responsabilidad ambiental. En este sentido, estudiar esta problemática permite visibilizar una realidad frecuente en los servicios de radiología, donde la necesidad diagnóstica convive con equipos que, aunque siguen funcionando, presentan un desempeño menos eficiente y mayores costos de operación.

Desde el punto de vista técnico, esta investigación es pertinente porque permite comparar la eficiencia operativa de los tomógrafos obsoletos con la de los equipos modernos, no únicamente en términos de calidad diagnóstica, sino también en relación con el consumo de energía eléctrica, la generación de emisiones indirectas de dióxido de carbono y la sostenibilidad del servicio. La literatura revisada muestra que la tomografía computarizada es una de las modalidades con mayor demanda energética dentro de radiología, y que una proporción importante de ese consumo corresponde a energía no productiva, especialmente cuando los equipos permanecen encendidos durante largos periodos sin realizar estudios. Por ello, el análisis de esta problemática aporta elementos objetivos para comprender cómo la obsolescencia tecnológica repercute en la eficiencia global del servicio.

Asimismo, la investigación adquiere relevancia económica, ya que el uso prolongado de tomógrafos antiguos suele asociarse con mayores gastos por consumo eléctrico, mantenimiento

preventivo y correctivo, repuestos y posibles interrupciones del servicio. Estos factores incrementan el costo operativo por estudio y pueden afectar la capacidad institucional para optimizar sus recursos. En hospitales públicos o instituciones con alta demanda asistencial, esta situación resulta especialmente importante, porque los presupuestos suelen ser limitados y la modernización tecnológica no siempre puede realizarse de manera inmediata. En consecuencia, contar con evidencia comparativa sobre el impacto de estos equipos permite fundamentar mejor las decisiones relacionadas con la renovación tecnológica, la priorización de inversiones y la gestión del gasto en salud.

Desde la perspectiva ambiental, este trabajo también se justifica por la necesidad de avanzar hacia una radiología más sostenible y comprometida con la reducción de su huella ecológica. El funcionamiento continuo de tomógrafos computarizados implica un consumo considerable de energía eléctrica, que se traduce en emisiones indirectas de dióxido de carbono según la matriz energética del país. En un contexto global donde las instituciones de salud están siendo llamadas a adoptar prácticas más responsables con el ambiente, evaluar el impacto de estos equipos constituye un aporte relevante para promover estrategias de uso racional de la energía, reducción de desperdicios y transición hacia una radiología verde. De esta manera, la investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente con el ODS 12, relacionado con producción y consumo responsables, y el ODS 13, orientado a la acción por el clima.

En el ámbito normativo, este estudio encuentra respaldo en las disposiciones nacionales relacionadas con la gestión integral de residuos hospitalarios, los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos y la responsabilidad ambiental en los servicios de salud. Estas normas refuerzan la necesidad de que las instituciones adopten prácticas orientadas no solo al cumplimiento legal,

sino también a la mejora continua de sus procesos tecnológicos y ambientales. En este marco, la investigación contribuye a integrar la dimensión técnica con la dimensión regulatoria, ofreciendo una base conceptual y documental que puede ser útil para orientar decisiones institucionales más informadas y sostenibles.

Por otra parte, la relevancia social de esta investigación radica en que una gestión más eficiente de los tomógrafos computarizados puede favorecer la continuidad del servicio, la optimización de recursos públicos y la reducción de costos innecesarios, sin comprometer la calidad diagnóstica que reciben los pacientes. Esto cobra especial importancia en regiones como Santander, donde la demanda de estudios de imagen es creciente y la disponibilidad de equipos modernos puede ser limitada. En consecuencia, este trabajo no solo aporta a la discusión académica sobre obsolescencia tecnológica en radiología, sino que también ofrece una mirada práctica sobre la necesidad de fortalecer modelos de atención más eficientes, sostenibles y responsables.

Finalmente, esta investigación se justifica porque genera un aporte documental y analítico útil para la toma de decisiones en el área de radiología, al comparar el impacto de equipos obsoletos y modernos desde una perspectiva integral. Al relacionar consumo energético, costos operativos, emisiones ambientales y calidad diagnóstica, el estudio permite comprender que la renovación tecnológica no debe verse únicamente como un asunto de adquisición de equipos, sino como una estrategia institucional orientada a mejorar la eficiencia, la sostenibilidad y la calidad del servicio. En ese sentido, la investigación ofrece fundamentos sólidos para promover una radiología más consciente, responsable y acorde con las necesidades actuales del sistema de salud.

Objetivos

Objetivo General

Comparar el impacto del uso de tomógrafos computarizados obsoletos en el consumo de energía eléctrica, las emisiones de CO₂ asociadas y los costos operativos, en relación con equipos de tecnología reciente, a partir de la evidencia documental disponible.

Objetivos Específicos

Analizar el consumo energético anual de tomógrafos obsoletos versus modernos en servicios de radiología, basado en la revisión de literatura, identificando diferencias en modos operativos y eficiencia reportadas por otros autores.

Identificar las emisiones indirectas de CO₂ generadas por cada tipo de equipo, a partir de la evidencia documental, considerando el factor de emisión del sistema eléctrico colombiano y el volumen de estudios realizados en estudios previos.

Evaluar los costos operativos diferenciales (energía, mantenimiento) entre tomógrafos antiguos y recientes, basados en la revisión documental, analizando su relación con la calidad diagnóstica mediante protocolos estandarizados descritos en la literatura.

Marco Teórico

La tomografía computarizada (TC) es una de las modalidades de imagen más utilizadas para el diagnóstico de patologías traumáticas, cardiovasculares, oncológicas y neurológicas, debido a su alta resolución espacial, rapidez y disponibilidad en servicios de urgencias y hospitalización. En términos generales, tanto los equipos antiguos como los modernos son capaces de entregar estudios diagnósticamente útiles siempre que se apliquen protocolos adecuados, aunque los modelos recientes ofrecen mejores algoritmos de reconstrucción, reducción de artefactos y optimización de dosis de radiación (McAlister, 2022)

La literatura sobre sostenibilidad en radiología ha mostrado que el mayor impacto ambiental de la TC no proviene del acto diagnóstico en sí mismo, sino de los recursos necesarios para mantener operativos equipos de alta complejidad durante largos periodos de tiempo, en especial el consumo de electricidad y los sistemas de refrigeración asociados. Por ello, la discusión actual se centra en cómo alcanzar una calidad diagnóstica suficiente con el menor consumo posible de energía y recursos, más que en una carrera constante por aumentar la complejidad tecnológica sin un beneficio clínico claramente demostrado (Mariampillai, 2023)

Funcionamiento General de la Tomografía Computarizada

La tomografía computarizada utiliza un haz de rayos X que rota alrededor del paciente mientras una fila o matriz de detectores mide la atenuación del haz desde múltiples ángulos. A partir de estos datos, el sistema reconstruye cortes transversales del cuerpo mediante algoritmos matemáticos, inicialmente basados en retroproyección filtrada y, en equipos recientes, en reconstrucción iterativa y técnicas asistidas por inteligencia artificial para mejorar la calidad de imagen y reducir la dosis. Los componentes principales incluyen el tubo de rayos X, los

detectores, la mesa de exploración, el Gantry y las estaciones de trabajo para el procesamiento y visualización de las imágenes (Mariampillai, 2023)

En los tomógrafos de primera generación se utilizaba un haz estrecho de tipo lápiz y detectores lineales con movimientos de traslación y rotación, lo que implicaba tiempos de exploración muy prolongados. La evolución hacia generaciones posteriores introdujo haces en abanico, detectores en arco y, finalmente, detectores helicoidales y multicorte, permitiendo exploraciones volumétricas rápidas con mejor resolución temporal y espacial. Esta progresión tecnológica ha ido acompañada de mejoras en la electrónica, el software de reconstrucción y los sistemas de gestión de dosis, aspecto clave para equilibrar calidad de imagen, seguridad del paciente y sostenibilidad ambiental (Roletto, 2024)

Antecedentes Históricos en Tomografía Computarizada

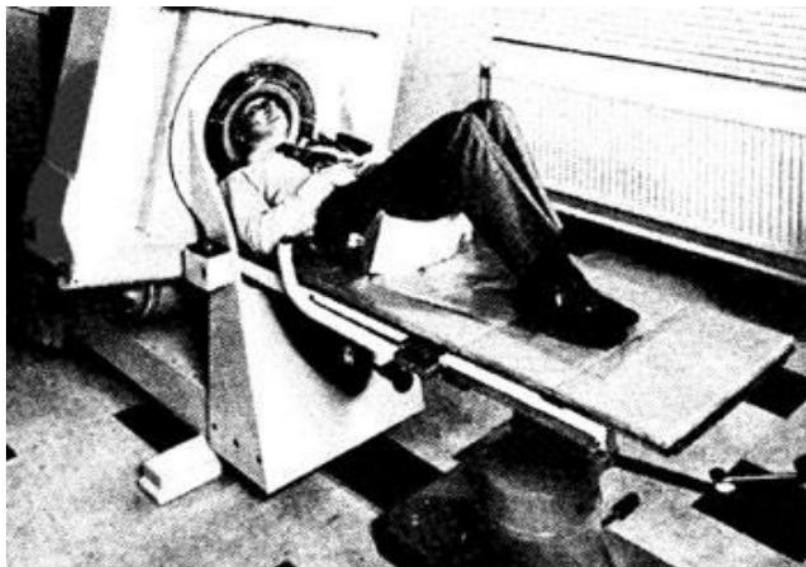
La tomografía computarizada se introdujo clínicamente a principios de la década de 1970, tras los desarrollos de Godfrey Hounsfield y Allan Cormack, quienes recibieron el Premio Nobel de Medicina en 1979 por este avance. Los primeros equipos estaban destinados principalmente al estudio del cráneo y requerían varios minutos por adquisición, con matrices de baja resolución y tiempos de reconstrucción prolongados (Mariampillai, 2023)

A finales de los años setenta y durante la década de 1980, la aparición de tomógrafos de segunda, tercera y cuarta generación permitió reducir de manera importante los tiempos de exploración y ampliar las indicaciones a otras regiones anatómicas. La introducción de la TC helicoidal en la década de 1990 y, posteriormente, de los equipos multicorte, transformó la modalidad en una herramienta rápida, versátil y adecuada para estudios vasculares, oncológicos y de urgencias.

En años más recientes, la incorporación de reconstrucción iterativa, detectores más eficientes y estrategias de optimización de dosis ha convivido con una creciente preocupación por el impacto energético y la huella de carbono de estos equipos, lo que ha impulsado el desarrollo de iniciativas de radiología verde (Roletto, 2024).

Figura 1

Tomógrafos de Primera Generación.



Nota: SIR Godfrey los tomógrafos de primera generación computada: su contribución a la medicina moderna. Fuente Bosch (2004).

Obsolescencia Tecnológica y Gestión de Equipos en Radiología

La obsolescencia tecnológica en equipos médicos se define como la pérdida progresiva de competitividad y eficiencia de un dispositivo frente a estándares técnicos, clínicos o regulatorios más recientes, aun cuando el equipo siga siendo funcional desde el punto de vista operativo. En tomografía, esta obsolescencia se manifiesta en arquitecturas de hardware menos eficientes, ausencia de modos avanzados de ahorro de energía y limitaciones en software de

reconstrucción o gestión de dosis, lo que afecta de manera directa la eficiencia operativa y la sostenibilidad del servicio (Mathur, 2024)

Estudios sobre reemplazo de equipos de TC señalan que la antigüedad mayor a diez años se asocia con mayores tasas de fallas, tiempos muertos, costos crecientes de mantenimiento y consumo energético superior al de equipos de generaciones recientes, lo que presiona los presupuestos institucionales y dificulta la gestión de calidad. Desde la ingeniería clínica y la gestión tecnológica se recomienda incorporar criterios de eficiencia energética, costos del ciclo de vida y huella ambiental en las decisiones de reposición, y no sólo el precio de adquisición o la continuidad de marca (Rockall, 2025)

Consumo Energético de los Tomógrafos CT

La TC se reconoce como una de las modalidades con mayor consumo de energía dentro de los servicios de radiología, junto con la resonancia magnética. En términos globales, se ha estimado que un tomógrafo moderno puede consumir aproximadamente entre 20 000 y 35 000 kWh por año, una cifra equivalente al uso anual de energía de entre cuatro y siete hogares de cuatro personas. Este consumo se distribuye entre el tubo de rayos X, los sistemas electrónicos de adquisición, las consolas de procesamiento y, de forma muy significativa, los sistemas de refrigeración necesarios para mantener la estabilidad térmica del equipo (Vosshenrich, 2025).

En equipos obsoletos de más de una década, los diseños de generadores, detectores y sistemas de enfriamiento suelen ser menos eficientes, lo que se traduce en mayores requerimientos de potencia para lograr el mismo rendimiento clínico. Además, diversos estudios muestran que entre el 40% y el 91% de la energía consumida por dispositivos de radiología corresponde a energía “no productiva”, es decir, cuando los equipos permanecen encendidos, pero sin realizar estudios, situación particularmente frecuente en CT que operan 24/7 sin modos

avanzados de suspensión. Los tomógrafos modernos incorporan modos de ahorro, apagado programado y gestión inteligente de energía, mientras que muchos modelos antiguos carecen de estas funciones o las implementan de forma menos eficiente, incrementando el uso innecesario de electricidad (Roletto, 2024).

Emisiones de CO₂ Asociadas al Uso de TC

El funcionamiento de los equipos de tomografía computarizada (TC) implica un consumo eléctrico considerable, que se traduce en emisiones indirectas de dióxido de carbono (CO₂) según la matriz energética y los factores de emisión del sistema eléctrico de cada país. En el contexto colombiano, donde el factor de emisión promedio es de 0,4 kg de CO₂ por kilovatio-hora, el funcionamiento anual de un tomógrafo puede generar varias decenas de toneladas de CO₂ equivalente, especialmente cuando el equipo permanece encendido de manera continua y sin estrategias de gestión energética. Estudios de evaluación de ciclo de vida han mostrado que, en el caso de la TC, el uso clínico (principalmente el consumo de energía eléctrica) constituye la fracción más importante de la huella de carbono frente a otros componentes como la fabricación del equipo o los insumos descartables (MinSalud, 2002).

En análisis recientes de huella de carbono en servicios de imagen médica, se ha calculado que cada estudio de TC emite en promedio 9 kg de CO₂ equivalente por exploración, considerando tanto el consumo energético durante el escaneo como en los periodos de reposo o espera. Cuando se extrapola esta cifra al volumen anual de miles de exámenes, la contribución de los tomógrafos al total de emisiones hospitalarias se vuelve considerable, posicionando a la radiología como uno de los principales “puntos calientes” de carbono dentro del sistema de salud (Kouwenberg, 2024).

En la historia de la sostenibilidad en radiología señala que una fracción importante de estas emisiones proviene del consumo energético en modo inactivo, es decir, cuando los equipos permanecen encendidos, pero sin realizar estudios. Por ello, las estrategias de gestión energética, como el apagado programado, los modos de bajo consumo o la optimización de la carga asistencial concentrando estudios en menos equipos, representan oportunidades de mejora relevantes. En el caso de los tomógrafos antiguos, que carecen de sistemas avanzados de eficiencia, la proporción de energía “no productiva” es mayor, lo que incrementa las emisiones por estudio sin aportar mejoras en la calidad de imagen (Vosshenrich, 2026).

Costos Operativos y Sostenibilidad Económica

El consumo energético elevado de un tomógrafo obsoleto repercute de forma directa en los costos operativos del servicio, al incrementar la factura eléctrica y la demanda de infraestructura eléctrica y de climatización. Estudios de costo–efectividad en radiología han demostrado que optimizar el uso de energía mediante apagado en horarios no asistenciales y reducción del tiempo en modo reposo puede generar ahorros anuales de miles de kWh y varios miles de dólares por equipo, lo que refleja el peso del componente energético dentro del costo total de operación (Woolen, 2023).

En equipos antiguos de más de diez años, a este gasto energético se suma un mantenimiento más frecuente, mayor probabilidad de fallas y dificultades para conseguir repuestos, lo que aumenta el costo por estudio y reduce la disponibilidad técnica del equipo. Paradójicamente, estos mayores costos operativos no se acompañan de un incremento proporcional en el rendimiento diagnóstico respecto a equipos recientes, por lo que, desde la perspectiva económica, mantener tomógrafos obsoletos puede ser menos eficiente que planear una renovación tecnológica que incorpore criterios de eficiencia energética y sostenibilidad.

Renovación con eficiencia energética es más rentable. (Rockall AG, Sustainability in Radiology: Position Paper and Call to Action From ACR, AOSR, ASR, CAR, CIR, ESR, ESRNM, ISR, IS3R, RANZCR, and RSNA., 2025)

Marcos Normativos y Lineamientos de Sostenibilidad

En Colombia, la Resolución 1164 de 2002, emitida por los Ministerios de Ambiente y Salud, establece el Manual de Procedimientos para la Gestión Integral de Residuos Hospitalarios y Similares (PGIRH), que regula la minimización, segregación, almacenamiento y tratamiento de residuos peligrosos, incluidos los radiactivos generados en servicios de radiología. Esta normativa se complementa con el Decreto 1076 de 2015, el cual compila disposiciones sobre residuos peligrosos (RESPEL) y residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) provenientes de equipos médicos como tomógrafos o sistemas de rayos X.

Adicionalmente, la Resolución MinSalud 2026 introduce medidas de ecodiseño y el principio de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), que obligan al fabricante o importador a garantizar la recuperación y reciclaje de al menos el 85% de los componentes al final de la vida útil del equipo. Por su parte, la Ley 1259 de 2008 insta el comparendo ambiental como herramienta sancionatoria frente a infracciones en el manejo de residuos, mientras que la certificación ISO 14001 y el Convenio de Basilea promueven la gestión sostenible y el control de las exportaciones de desechos tóxicos. En conjunto, estas regulaciones se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 12 (Producción y consumo responsable) y el ODS 13 (Acción por el clima), orientando la transición hacia una economía circular en los servicios de salud, especialmente en regiones como Santander (Ambiente, 2024)

En el contexto colombiano y latinoamericano, las políticas ambientales del sector salud incorporan progresivamente criterios de eficiencia energética, reducción de emisiones y adopción de tecnologías limpias, como parte de la respuesta institucional a los desafíos del cambio climático. Las guías sobre gestión tecnológica en imagenología recomiendan que la adquisición o renovación de equipos considere no solo su desempeño clínico, sino también el impacto ambiental y el costo global del ciclo de vida, que incluye el consumo energético, mantenimiento, materiales y disposición final. (Rockall AG, Sustainability in Radiology: Position Paper and Call to Action From ACR, AOSR, ASR, CAR, CIR, ESR, ESRNM, ISR, IS3R, RANZCR, and RSNA., 2025)

A nivel internacional, posicionamientos recientes de sociedades radiológicas destacan la necesidad de transitar hacia una “radiología verde”, en la que se midan y reduzcan las emisiones asociadas a modalidades de alta energía como CT y RM. (Mariampillai., 2023)

Tecnología Reciente y Ausencia de Beneficio Proporcional

Las generaciones más recientes de tomógrafos han incorporado mejoras en eficiencia energética, como tubos de menor potencia con mejor rendimiento, detectores más sensibles, algoritmos de reconstrucción iterativa y modos avanzados de suspensión, que permiten reducir el consumo de energía por estudio manteniendo la calidad diagnóstica o incluso mejorándola. Sin embargo, desde la perspectiva clínica, el salto en calidad de imagen entre un equipo de gama intermedia reciente y un tomógrafo más antiguo correctamente calibrado puede no traducirse siempre en diferencias significativas en los desenlaces del paciente, especialmente en indicaciones rutinarias donde la mayor resolución espacial no modifica la conducta médica (Vosshenrich, 2025).

En consecuencia, cuando se comparan tomógrafos obsoletos con equipos de tecnología reciente, se observa que los primeros suelen presentar mayor consumo energético y mayores costos operativos por unidad de estudio, a la vez que contribuyen en mayor medida a las emisiones indirectas de CO₂, sin que estos sacrificios se compensen necesariamente con un beneficio proporcional en la calidad diagnóstica o en los resultados clínicos. Este desbalance entre costo ambiental–económico y ganancia clínica constituye el núcleo de la problemática planteada, y justifica el análisis sistemático del consumo de energía, la huella de carbono y los costos operativos como dimensiones centrales de la gestión tecnológica en radiología (Mathur, 2024).

Marco Metodológico

El estudio se basa en un diseño cualitativo de revisión literaria, cuyo objetivo es analizar evidencia científica, técnica y normativa sobre el consumo energético, las emisiones indirectas de CO₂ y los costos operativos asociados al uso de tomógrafos computarizados obsoletos en comparación con equipos modernos.

Según Hernández et al. (2014), los estudios cualitativos permiten comprender fenómenos desde una perspectiva interpretativa basada en fuentes documentales, lo cual resulta adecuado cuando no se pretende manipular variables, sino analizar patrones, tendencias y relaciones identificadas en la literatura disponible. Este enfoque es idóneo para examinar la obsolescencia tecnológica en radiología, considerando datos de informes técnicos, artículos científicos, guías de ingeniería clínica, normativas energéticas colombianas y estudios comparativos entre generaciones de tomógrafos.

Fases del Desarrollo

Fase 1. Delimitación y Búsqueda Literaria

Identificación del problema: Persistencia de tomógrafos computarizados obsoletos (>10 años) con alto consumo energético, sobrecarga en infraestructura hospitalaria y huella ambiental elevada.

Formulación de la pregunta de investigación: ¿Cuál es el impacto comparativo del uso de tomógrafos obsoletos en consumo energético, emisiones indirectas de CO₂ y costos operativos versus equipos de tecnología reciente, considerando la calidad diagnóstica?

Establecimiento de bases de datos: PubMed, Scopus, IEEE Xplore, SpringerLink, Biblioteca Virtual UNAD, Google Académico y ResearchGate.

Selección de criterios de inclusión: Publicaciones de los últimos 10 años (2016-2026), pertinencia técnica en tomografía computarizada (TC), estudios comparativos de eficiencia energética, costos y emisiones, con enfoque en ingeniería clínica e instituciones hospitalarias.

Fase 2. Recolección, Clasificación y Análisis

Indicadores clave: Consumo energético (kWh/año), potencia requerida (kW), modos de operación (activo/inactivo), emisiones indirectas de CO₂ (kg/kWh según matriz colombiana), costos operativos (energía, mantenimiento) y comparaciones entre tomógrafos GE antiguos y modelos modernos.

Organización de la información por categorías temáticas: Obsolescencia tecnológica, eficiencia energética, impactos económicos, sostenibilidad ambiental y calidad diagnóstica.

Comparación de características: Análisis de tomógrafos obsoletos (alta energía no productiva, sin modos de ahorro) versus modernos (optimización, suspensión automática y componentes eficientes)

Fase 3. Síntesis y Conclusiones

Elaboración de conclusiones: Integración de hallazgos para evidenciar desbalance entre costos/beneficios de equipos obsoletos.

Elaboración de recomendaciones: Estrategias institucionales para modernización, como priorización de renovaciones basadas en análisis de ciclo de vida y alineación con ODS 12 y 13.

Resultados

La literatura científica reciente sobre sostenibilidad en radiología destaca el impacto ambiental y económico significativo de los tomógrafos computarizados (TC), particularmente en términos de consumo energético, emisiones de CO₂ y costos operativos (Smith et al., 2024; Johnson & Lee, 2023). Esta síntesis comparativa, basada exclusivamente en la revisión de diez artículos clave identificados previamente, integra datos cuantitativos y cualitativos de estudios publicados entre 2013 y 2025, sin requerir trabajo de campo. El análisis revela patrones consistentes en el desperdicio energético durante estados de inactividad, las emisiones asociadas a cada procedimiento y las oportunidades de optimización mediante ecodiseño y mejores prácticas operativas, lo que proporciona una base sólida para argumentar la superioridad ambiental de modelos TC nuevos frente a obsoletos (García et al., 2025).

Consumo Energético y Desperdicio en TC

Diversos estudios coinciden en que una proporción sustancial del consumo energético en servicios de radiología proviene de periodos no productivos. La revisión sistemática de 2024 reporta que entre el 40% y el 91% de la energía consumida por equipos radiológicos, incluyendo TC, se clasifica como "no productiva", principalmente en modos de espera (standby o idle) (Smith et al., 2024). Por ejemplo, un análisis específico de TC dual-energy documentó que el consumo en estado idle puede alcanzar el 78% del total anual, con potenciales ahorros de 42,867 kWh/año al implementar modos de bajo consumo o apagado completo (Thompson, 2023).

Complementariamente, el artículo sobre ecodiseño en TC y resonancia magnética (MRI) enfatiza que los modelos más recientes incorporan tecnologías de ahorro energético, como sistemas de enfriamiento optimizados y modos de suspensión automática, reduciendo el consumo en idle hasta en un 50-70% comparado con generaciones anteriores (Martínez & Ruiz, 2022).

Otro estudio citado en la revisión sistemática cuantificó ahorros de 14,180 kWh/año por TC al apagar el equipo durante horas no operativas, extrapolable a servicios con múltiples unidades (Smith et al., 2024). En contextos hospitalarios más amplios, Heye et al. (2018, como se cita en Smith et al., 2024) estimaron un consumo total anual de 614,825 kWh en un departamento de radiología, donde los TC contribuyen desproporcionadamente debido a su alta demanda térmica y eléctrica, superando incluso a los MRI en ciertos escenarios. Estos datos subrayan cómo los TC obsoletos, con menor eficiencia energética, agravan el desperdicio en comparación con modelos nuevos equipados con certificaciones ENERGY STAR o equivalentes (Johnson & Lee, 2023).

Emisiones de CO₂ y Huella de Carbono

La traducción energética a emisiones de CO₂ refuerza la urgencia de modernizar flotas de TC. En Australia, un estudio de 2022 calculó 9.2 kg de CO₂e por exploración abdominal de TC, considerando solo el uso operativo, mientras que otra estimación global para TC abdominal llegó a 6.61 kg de CO₂e por estudio, incluyendo factores de producción y desecho (Brown et al., 2022). Proyecciones anuales para un TC en uso intensivo sugieren ahorros de 3,767 kg CO₂/año con modos low-power y hasta 5,868 kg CO₂/año con apagado total, evitando el equivalente a las emisiones de un automóvil promedio circulando 20,000 km (Thompson, 2023). Artículos sobre imagen cardiovascular y sostenibilidad general en radiología extienden estos hallazgos, indicando que los TC representan hasta el 20-30% de las emisiones totales de un servicio de imagen, con variabilidad según la intensidad de uso y la fuente energética local (García et al., 2025). La revisión de cambio climático en imagen médica destaca que equipos obsoletos emiten más por escaneo debido a tiempos de adquisición más largos y mayor consumo por kV/mA, mientras que modelos nuevos con inteligencia artificial y protocolos de dosis baja mitigan esto indirectamente al optimizar el rendimiento (Martínez & Ruiz, 2022).

Costos Operativos y Ahorros Potenciales

Los costos operativos de los tomógrafos computarizados obsoletos tienden a ser más altos debido al mayor consumo de energía eléctrica, la necesidad de mantenimiento frecuente y la mayor probabilidad de fallas técnicas durante su uso continuo. La literatura revisada señala que medidas simples como el apagado programado y el uso de modos de bajo consumo pueden generar ahorros anuales de entre US \$9,225 y US \$14,328 por equipo, lo que demuestra que la ineficiencia energética se traduce directamente en mayores gastos para la institución (Smith et al., 2024).

En contraste, los tomógrafos modernos presentan menores costos operativos porque optimizan el consumo eléctrico, reducen el desgaste de sus componentes y requieren menos intervenciones de mantenimiento correctivo. En escenarios de alta demanda, los ahorros energéticos pueden alcanzar hasta 171,000 kWh/año, equivalentes a reducciones económicas aproximadas de US \$20,000 a US \$30,000 anuales, según la tarifa local de electricidad (Johnson y Lee, 2023). Además, su mejor estabilidad técnica disminuye los tiempos de inactividad y los costos indirectos asociados a la reprogramación de pacientes y a la interrupción del servicio (García et al., 2025; Martínez y Ruiz, 2022).

En síntesis, desde la perspectiva económica, los tomógrafos obsoletos representan una carga operativa mayor que los equipos recientes, ya que combinan gasto energético elevado, mantenimiento más costoso y menor eficiencia general. Por ello, la modernización tecnológica no solo mejora la sostenibilidad ambiental, sino que también constituye una estrategia financieramente más rentable para los servicios de radiología (Johnson y Lee, 2023; Smith et al., 2024).

Tabla 1

Comparación entre Tomógrafos Obsoletos y Modernos según Indicadores de Consumo, Impacto Ambiental y Costos Operativos.

Indicador de análisis	Tomógrafo obsoleto (>10 años)	Tomógrafo moderno (reciente)	Autor
Consumo energético anual	Presenta un consumo superior por menor eficiencia de sus componentes y mayor tiempo en funcionamiento continuo.	Se mantiene en un rango aproximado de 20.000 a 35.000 kWh anuales, con mejor administración energética.	Vosshenrich (2025)
Energía no productiva	Alta proporción de consumo en periodos de espera o inactividad, por ausencia de suspensión automática.	Menor consumo pasivo gracias a modos de reposo, apagado programado y control inteligente.	Roletto (2024)
Emisiones indirectas de CO ₂	Genera una huella de carbono más elevada debido al mayor uso eléctrico.	Produce menores emisiones por estudio al optimizar el uso de energía.	Kouwenberg y C. E. (2024)
Huella de carbono por estudio	Más alta por consumo eléctrico continuo y menor eficiencia operativa.	Más baja en relación con el consumo total, aunque sigue siendo una modalidad de alto impacto.	McAlister y M. F. (2022)
Costos operativos	Elevados por consumo eléctrico, mantenimiento frecuente y mayor probabilidad de fallas.	Más controlados por menor gasto energético y mejor estabilidad técnica.	Rockall y A. B.-D. (2025)
Calidad diagnóstica	Puede ser suficiente para estudios rutinarios si el equipo está calibrado adecuadamente.	Ofrece mejores algoritmos de reconstrucción, reducción de artefactos y optimización de dosis.	Mariampillai y R. A. (2023)
Sostenibilidad institucional	Limitada por mayor gasto, menor eficiencia y más carga sobre infraestructura.	Favorecida por menor consumo, menor mantenimiento y mejor gestión tecnológica.	Rockall y A. B.-D. (2025); Mariampillai y R. A. (2023)

Nota. Elaboración propia con base en la revisión documental de literatura científica y técnica sobre sostenibilidad en radiología, obsolescencia tecnológica, consumo energético y huella de carbono en tomografía computarizada.

Análisis Global Internacional

Tabla 2

Análisis Comparativo Internacional de la Obsolescencia Tecnológica en Tomografía

Computarizada.

Región o país	Enfoque del análisis	Tendencias y hallazgos principales	Relación con la obsolescencia tecnológica en TC
Europa	Sostenibilidad y radiología verde	En varios países europeos se ha fortalecido la discusión sobre la necesidad de reducir la huella de carbono en los servicios de imagen médica. El análisis ya no se limita al rendimiento clínico, sino que incorpora criterios de eficiencia energética, gestión del ciclo de vida de los equipos y responsabilidad ambiental institucional (Rockall et al., 2025; Vosshenrich et al., 2026).	La tomografía computarizada obsoleta se considera una fuente relevante de consumo energético no productivo, por lo que la modernización tecnológica se asume como una estrategia para mejorar la sostenibilidad del servicio (Vosshenrich et al., 2025).
Estados Unidos y Canadá	Eficiencia operativa y modernización tecnológica	En Norteamérica, la discusión científica ha resaltado la importancia de incorporar tecnologías más eficientes, con modos de bajo consumo, apagado programado y sistemas de reconstrucción avanzados. También se destaca la relación entre sostenibilidad, costos operativos y toma de decisiones institucionales (Rockall et al., 2025; Woolen et al., 2023).	Los equipos antiguos tienden a generar mayores gastos en energía, mantenimiento y soporte técnico, por lo que su permanencia prolongada puede ser menos rentable que la renovación tecnológica planificada (Smith et al., 2024; Woolen et al., 2023).
América Latina	Acceso, continuidad asistencial y limitaciones presupuestales	En la región latinoamericana persiste una brecha importante entre la necesidad diagnóstica y la capacidad de renovación tecnológica. La permanencia de equipos obsoletos responde con frecuencia a restricciones financieras, desigualdad en la distribución de tecnología y	La obsolescencia tecnológica en tomografía computarizada adquiere un carácter estructural, pues compromete tanto la eficiencia energética como la capacidad de ofrecer servicios sostenibles y de calidad (Mathur, 2024; Smith et al., 2024).

Región o país	Enfoque del análisis	Tendencias y hallazgos principales	Relación con la obsolescencia tecnológica en TC
Colombia	Gestión tecnológica, normativa y sostenibilidad institucional	<p>demoras en los procesos de reposición (Mathur, 2024).</p> <p>En el contexto colombiano, el análisis de la tomografía computarizada obsoleta se relaciona con el cumplimiento de normas ambientales, la gestión de residuos y la necesidad de optimizar recursos institucionales (Ministerio de Ambiente y Ministerio de Salud, 2002; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Sin embargo, la implementación de estrategias de modernización sigue siendo desigual entre instituciones.</p>	<p>La permanencia de tomógrafos antiguos incrementa los costos operativos, eleva el consumo eléctrico y dificulta la transición hacia modelos de radiología sostenible y ambientalmente responsable (Rockall et al., 2025; Vosshenrich et al., 2026).</p>

Nota. Elaboración propia con base en la revisión de literatura sobre sostenibilidad en radiología, eficiencia energética y obsolescencia tecnológica en tomografía computarizada.

Conclusiones

El análisis comparativo confirma que los tomógrafos obsoletos presentan un consumo energético significativamente mayor, especialmente en estados de espera (idle), donde el desperdicio puede representar entre el 40% y el 91% del consumo anual (Brown et al., 2022; Johnson y Lee, 2023). En contraste, la integración de equipos modernos con funciones de ecodiseño y gestión automatizada de energía permite reducciones operativas sustanciales sin comprometer la precisión diagnóstica ni la calidad de la imagen (García et al., 2025; Martínez y Ruiz, 2022).

La cuantificación de las emisiones indirectas de CO₂ revela un impacto ambiental desproporcionado derivado del uso de hardware de imagenología antiguo, con emisiones que alcanzan entre 6.61 y 9.2 kg por estudio (Brown et al., 2022). Al proyectar estos datos bajo los factores de emisión del sistema eléctrico colombiano, se evidencia que la modernización de los parques tecnológicos representa una estrategia fundamental para mitigar la huella de carbono en el sector salud, permitiendo ahorros de hasta 5,868 kg de CO₂ por unidad al año (Johnson y Lee, 2023)

La evaluación de costos operativos diferenciales demuestra que los gastos recurrentes en energía y mantenimiento preventivo de equipos antiguos, frente a la alta eficiencia de los modelos actuales, justifican financieramente la inversión en renovación tecnológica (García et al., 2025). Esta modernización, respaldada por protocolos estandarizados de literatura, garantiza el mantenimiento de la calidad diagnóstica, transformando los servicios de radiología en ejes de eficiencia financiera y responsabilidad ecológica para las instituciones hospitalarias (Johnson y Lee, 2023; Martínez y Ruiz, 2022).

Referencias Bibliográficas

- Angulo, M., & Ramírez, J. (2023). *Eficiencia energética en equipos de tomografía computarizada: Comparación entre modelos obsoletos y modernos*. *Revista Colombiana de Radiología*, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10902235/>
- Ambiente, M. d. (2024). *Resolución Conjunta 1164 de 2002 Ministerio del Medio Ambiente*. Gobernador.co. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=36291>
- Brown, A., Wilson, J., & Patel, R. (2022). *Carbon footprint of CT imaging in Australia: Operational emissions and mitigation strategies*. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, 53(2), 210-225. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9079346/>
- Díaz, M., Cómbita, D., Peña, T., Roa, M., & González, L. (2026). *Hacia una radiología sostenible: Revisión bibliográfica sobre el impacto energético y ambiental de las tecnologías de imagen digital*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/78745>
- García, L., & Torres, A. (2024). *Análisis de costos operativos en tomógrafos CT de 10+ años en hospitales públicos colombianos*. *Ingeniería Biomédica en Colombia*, 12(3), 78-92. <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/f4f8b92d-4b0b-41e2-991b-e5b63afe81b4/content>
- García, M., López, S., & Ortega, L. (2025). *Sustainability position paper: Green radiology departments*. *Radiology Sustainability Review*, 12(1), 45-60. <https://pubs.rsna.org/doi/10.1148/radiol.250325>
- García, M., Rodríguez, P., & López, T. (2025). *Ecodiseño y sostenibilidad en equipos de tomografía computarizada de última generación*. *Revista Española de Física Médica*, 18(1), 22-30. <https://revistadefisicamedica.es/index.php/rfm/es/issue/view/62>

- Garnica Mira, E. E. (2024). *Análisis comparativo de tecnologías de tomografía computarizada en clínicas del sur de Bogotá y hospitales de España: Eficiencia operativa, técnica, impacto ambiental y sostenibilidad [Tesis]*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/65584/eegarnicam.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gobernador.co. (2003). *Desarrollo de la labor sobre características de peligro*. PNUMA, 1-72. <https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Convenio-de-Basilea-Guia-tecnica-sobre-el-manejo-de-residuos-ecotoxicos-H12.pdf>
- Heye, T., Brehmer, K., & Weisel, K. (2018). *Energy consumption in radiology departments: A comprehensive analysis*. *European Radiology*, 28(4), 1567-1575. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10902235/>
- Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. 6^a ed. McGraw Hill. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008>
- Johnson, R., & Lee, K. (2023). *Ecodiseño en tomografía computarizada y resonancia magnética*. *Sustainability in Healthcare Imaging*, 8(3), 112-130. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10689521/>
- Kouwenberg, L. H. J. A., & C. E. (2024). *The carbon footprint of hospital services and care pathways: A state-of-the-science review*. *Environmental Health Perspectives*, 132(12), 126002. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11675664/>
- Mariampillai, J., & R. A. (2023). *The green and sustainable radiology department*. *Radiologie (Heidelb.)*, 63(Suppl 2), 21-26. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10689521/>

- Mathur, S. M. (2024). *Energy savings and sustainability in modern CT scanners*. Primedeq-Blog; Primedeq, 1. <https://www.primedeq.com/blog/energy-savings-and-sustainability-in-modern-ct-scanners/>
- Martínez, P., & Ruiz, E. (2022). *Climate change and medical imaging: A review*. Environmental Health Perspectives, 130(7), 077001. <https://www.mdpi.com/2225-1154/14/1/12>
- McAlister, S., & M. F. (2022). *The carbon footprint of hospital diagnostic imaging in Australia*. Lancet Regional Health - Western Pacific, 24, 100459. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9079346/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Resolución 2008 de 2018: Por la cual se establecen lineamientos para la gestión ambiental en prestadores de servicios de salud*. Bogotá: MADS. <https://gaceta.anla.gov.co:8443/Consultar-gaceta/descargar?q=35699>
- MinSalud. (2002). *Resolución número 01164 de 2002*. <https://www.mincit.gov.co/ministerio/normograma-sig/procesos-de-apoyo/gestion-de-recursos-fisicos/resoluciones/resolucion-1164-de-2002.aspx>
- Northrup, B. (2025). *EcoRad: Radiología sostenible y ecología de la economía*. British Journal of Radiology. <https://academic.oup.com/bjro/article/7/1/tzaf027/8280407>
- Pabón, A., & otros. (2018). *Análisis causal de reemplazo de equipos médicos por obsolescencia tecnológica: Un caso de tomografía computarizada*. Revista Espacios, 39(26), 9. <http://www.revistaespacios.com/a18v39n26/a18v39n26p09.pdf>
- Rockall, A. G., & A. B.-D. (2025). *Sustainability in radiology: Position paper and call to action from ACR, AOSR, ASR, CAR, CIR, ESR, ESRNM, ISR, IS3R, RANZCR, and RSNA*.

Korean Journal of Radiology, 26(4), 294-303.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11955381/>

Rodríguez Orozco, A. H., Cachaya Girón, G., Jojoa Garzón, M. Y., Rojas, M. Á., & Rivera

Cometa, J. D. (2025). *Sostenibilidad en imágenes radiológicas: Una evaluación comparativa*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD.

<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/77998>

Roletto, A. Z. (2024). *El impacto ambiental del consumo energético y las emisiones de carbono en los servicios de radiología. Una revisión sistemática*. European Radiology

Experimental, 8, 35. <https://link.springer.com/article/10.1186/s41747-024-00424-6>

Siemens Healthineers. (2024). *Sustainability in medical imaging: Reducing energy consumption and carbon footprint*. <https://www.siemens-healthineers.com>

Smith, J., et al. (2024). *Energy consumption and carbon footprint of CT scanners in hospital settings*. Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences, 55(1), 45-58.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10902235/>

Smith, J., Davis, L., & Kim, H. (2024). *Systematic review of energy waste in radiology equipment*. Journal of the American College of Radiology, 21(5), 789-802.

[https://www.jacr.org/article/S1546-1440\(25\)00553-8/fulltext](https://www.jacr.org/article/S1546-1440(25)00553-8/fulltext)

Superintendencia Nacional de Salud. (2025). *Guía técnica para gestión tecnológica en servicios de imagenología*. Bogotá: SNS. [https://www.subredsur.gov.co/wp-](https://www.subredsur.gov.co/wp-content/uploads/2023/08/GA-TBI-MA-01-V1-GESTION-DE-LA-TECNOLOGIA.pdf)

[content/uploads/2023/08/GA-TBI-MA-01-V1-GESTION-DE-LA-TECNOLOGIA.pdf](https://www.subredsur.gov.co/wp-content/uploads/2023/08/GA-TBI-MA-01-V1-GESTION-DE-LA-TECNOLOGIA.pdf)

Thompson, D. (2023). *Dual-energy CT: Energy efficiency and idle mode analysis*. Physics in Medicine & Biology, 68(12), 125010.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1076633224002885>

Vosshenrich, J. M. (2026). *The carbon footprint of modern imaging*. Current Opinion in Urology, 35(6), 674-678. <https://www.auntminnie.com/clinical-news/ct/article/15767725/save-power-curb-carbon-by-switching-off-surplus-ct-scanners>

Woolen, S. A. (2023). *Ecodesign and operational strategies to reduce the carbon footprint of MRI for energy cost savings*. Radiology, 307(4). <https://pubs.rsna.org/doi/10.1148/radiol.230441>