

**Limitaciones en la integración de sistemas IoT en radiología digital y su impacto en el
monitoreo en tiempo real, la generación de alertas de seguridad y la protección del
paciente**

Angélica Johanna Ortiz Martínez

Edwin David Barrera Hurtado

Fabian Leonardo Abril Angarita

Laura Daniela Alfonso Ruiz

Rememberth Andrés Escobar Garrido

Tutor

Alberto Guzmán Avilés

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias de la Salud - ECISA

Tecnología en Radiología e Imágenes Diagnósticas

2026

Dedicatoria

Dedicamos este diplomado a todas aquellas personas que, con su apoyo y motivación, hicieron posible la culminación de este proceso formativo.

A nuestras familias, por su paciencia, amor y comprensión en cada momento del camino.

A nosotros, Angélica Johanna Ortiz Martínez, Edwin David Barrera Hurtado, Fabián Leonardo Abril Angarita, Laura Daniela Alfonso Ruiz y Remberth Andrés Escobar Garrido, por compartir conocimientos, desafíos, conversaciones y aprendizajes que enriquecieron esta experiencia académica y humana.

A los tutores y a cada uno de ustedes, gracias por su disposición, su compromiso y por demostrar que el aprendizaje colaborativo transforma realidades.

Agradecimientos

Agradecemos en primer lugar a Dios, por guiarnos, brindarnos fortaleza, sabiduría y la oportunidad de culminar con éxito este proceso formativo.

A nuestros tutores, especialmente a Edna Rocío Jamaica y Alberto Guzmán Avilés, por su compromiso y orientación durante el desarrollo del diplomado, con sus conocimientos contribuyeron a nuestro crecimiento académico y profesional.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, por ofrecer espacios de aprendizaje flexible e inclusivo que transforman vidas y comunidades.

A nuestras familias por su amor, hombro, paciencia y apoyo incondicional, son el motor para continuar.

Finalmente, a nosotros, que compartimos experiencias, trabajo en equipo, haciendo de este proceso una etapa de crecimiento humano y profesional.

Resumen

La integración del IoT en los servicios de radiología digital ha permitido avances significativos en automatización, conectividad y monitoreo continuo de parámetros operativos y dosimétricos, lo que fortalece la supervisión en tiempo real y contribuye al cumplimiento del principio ALARA; sin embargo, su implementación presenta limitaciones técnicas, operativas y de ciberseguridad que comprometen la eficiencia del sistema y la seguridad del paciente con fallas de interoperabilidad, retrasos en la transmisión de datos, variabilidad en arquitecturas digitales, falta de estandarización en protocolos de comunicación y debilidades en la integración con sistemas PACS (Picture Archiving and Communication System) y RIS (Radiology Information System). Asimismo, los riesgos de ciberseguridad y la ausencia de controles robustos dificultan la transmisión continua de información, afectando la generación oportuna de alertas, la trazabilidad dosimétrica y la capacidad de respuesta a eventos críticos. Este estudio se basó en una revisión documental con análisis descriptivo y comparativo. Los resultados muestran que superar estas barreras técnicas y de seguridad es indispensable para garantizar un monitoreo confiable, mejorar la protección radiológica, optimizar la gestión de riesgos y avanzar hacia ecosistemas digitales más seguros, interoperables y eficientes. Finalmente, basados en la evidencia, se proponen lineamientos que orientan a fortalecer la integración del IoT en entornos radiológicos, garantizando la calidad del servicio y la seguridad del paciente.

Palabras clave: IoT, radiología digital, ciberseguridad, monitoreo dosimétrico, interoperabilidad.

Abstract

The integration of IoT within digital radiology services has enabled significant advances in automation, connectivity, and continuous monitoring of operational and dosimetric parameters, strengthening real-time supervision and supporting compliance with the ALARA principle. However, its implementation presents technical, operational, and cybersecurity limitations that compromise system efficiency and patient safety, including interoperability failures, delays in data transmission, variability in digital architectures, lack of standardization in communication protocols, and weaknesses in integration with PACS (Picture Archiving and Communication System) y RIS (Radiology Information System). Likewise, cybersecurity risks and the absence of robust controls hinder the continuous transmission of information, affecting the timely generation of alerts, dosimetric traceability, and the capacity to respond to critical events. This study was based on a documentary review with descriptive and comparative analysis. The findings show that overcoming these technical and security barriers is essential to ensure reliable monitoring, enhance radiological protection, optimize risk management, and advance toward safer, more interoperable, and more efficient digital ecosystems. Finally, based on the evidence, guidelines are proposed to strengthen IoT integration in radiological environments, ensuring service quality and patient safety.

Keywords: IoT, digital radiology, cybersecurity, dosimetric monitoring, interoperability.

Tabla de Contenido

Introducción.....	11
Planteamiento del Problema.....	13
Justificación.....	16
Objetivos.....	18
Objetivo General.....	18
Objetivos Específicos.....	18
Marco Teórico.....	19
IoT en Salud y Radiología.....	19
Ecosistema IoT en el Entorno Clínico.....	19
Arquitectura IoT en Radiología.....	20
Modelos de Procesamiento de Datos.....	22
<i>Edge Computing</i>	22
<i>Cloud Computing</i>	22
<i>Protocolos de Comunicación y Estándares de Interoperabilidad</i>	22
<i>Hardware IoT para Procesamiento de Metadatos DICOM en Tiempo Real</i>	23
Beneficios del IoT en Radiología.....	25
Sistemas PACS, RIS y DICOM.....	26
Dosimetría en Tomografía Computarizada.....	26
<i>Fundamentos de la Dosimetría en TC</i>	26
<i>Limitaciones del CTDivol</i>	27
Riesgos Radiológicos.....	27
SSDE y Estimación Personalizada de la Dosis.....	27

<i>Evolución de los Algoritmos SSDE</i>	27
<i>Algoritmos SSDE y su Impacto Clínico</i>	28
Evolución hacia el Reporte AAPM 220	30
Automatización y Deep Learning en la Estimación de SSDE.....	31
<i>Métodos Convencionales</i>	32
Precisión en Pacientes Pediátricos vs. Obesos	32
<i>Población Pediátrica</i>	32
<i>Pacientes Obesos</i>	32
Impacto Clínico: Comparación entre CTDIvol y SSDE	33
IA en Dosimetría	34
<i>Deep Learning</i>	35
Ciberseguridad en Sistemas Radiológicos.....	35
Normativa en Colombia.....	36
Regulaciones Internacionales y Principio ALARA.....	36
Niveles de Referencia para Diagnóstico (DRL) en Colombia	37
Metodología.....	39
Enfoque de Investigación	39
Tipo y Diseño de Estudio	39
Recolección de Información.....	40
Criterios de Inclusión.....	40
Criterios de Exclusión	41
Categorías de Análisis	41
Fases Metodológicas.....	41

<i>Fase 1. Búsqueda y Selección de Fuentes</i>	41
<i>Fase 2. Organización y Clasificación Temática</i>	41
<i>Fase 3. Análisis, Síntesis e Interpretación</i>	42
<i>Fase 4. Integración de Resultados y Recomendaciones</i>	42
Análisis de Resultados.....	43
Captura y Adquisición de Datos.....	43
Procesamiento Preliminar y Edge Computing.....	43
Transmisión y Comunicación entre Sistemas.....	43
Integración, Almacenamiento y Trazabilidad Dosimétrica	44
Generación de Alertas y Respuesta Automática.....	44
Limitaciones Identificadas en la Integración IoT en Radiología.....	44
Arquitectura IoT en Radiología Digital.....	45
Eficacia de las Métricas Avanzadas en Seguridad del Paciente.....	46
Impacto de IoT en el Monitoreo de Alarmas.....	46
Impacto Global en el Monitoreo en Tiempo Real y la Protección del Paciente.....	47
Contradicciones entre Autores.....	49
Conclusiones.....	62
Referencias Bibliográficas.....	64

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Fases de la investigación</i>	42
Tabla 2 <i>Recomendaciones para fortalecer la integración IoT basadas en la evidencia</i>	51
Tabla 3 <i>Propuesta para fortalecer la integración IoT</i>	54
Tabla 4 <i>Limitaciones en la integración del IoT en radiología digital</i>	55
Tabla 5 <i>Imprecisiones en la integración IoT en radiología</i>	61

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Árbol del problema</i>	13
Figura 2 <i>Ecuación de Diámetro Efectivo</i>	30
Figura 3 <i>Diámetro equivalente en agua</i>	31
Figura 4 <i>Ecuación del estimador de dosis específica por tamaño (SSDE)</i>	32
Figura 5 <i>Porcentaje de incidencias en la integración de IoT en radiología</i>	58

Introducción

La transformación digital en el ámbito de la salud ha impulsado la incorporación de tecnologías emergentes orientadas a optimizar los procesos clínicos, mejorar la precisión diagnóstica y fortalecer la seguridad del paciente. El Internet de las Cosas (IoT) se ha consolidado como un componente clave en la evolución de la radiología digital, al permitir la interconexión de dispositivos médicos, sensores inteligentes y sistemas de información como PACS (Picture Archiving and Communication System), RIS (Radiology Information System) y plataformas en la nube. Esta integración facilita la monitorización continua de equipos, la gestión de datos dosimétricos, la automatización de procesos críticos y la generación de alertas de seguridad en tiempo real, contribuyendo a una toma de decisiones más oportuna y a la mitigación de riesgos clínicos.

La capacidad del IoT para recopilar, transmitir y analizar datos en tiempo real representa una oportunidad significativa para mejorar la eficiencia operativa, la trazabilidad de la información y la protección radiológica del paciente. Sin embargo, su implementación efectiva enfrenta múltiples desafíos de carácter técnico, operativo y organizacional. Factores como la heterogeneidad de dispositivos, la limitada interoperabilidad entre sistemas, la baja estandarización de protocolos, la latencia en la transmisión de datos, las restricciones de infraestructura tecnológica y las vulnerabilidades en ciberseguridad pueden afectar la confiabilidad del sistema, dificultar el flujo de información y comprometer la calidad del servicio.

Estas limitaciones impactan directamente en la capacidad de los sistemas IoT para garantizar un monitoreo continuo, generar alertas de seguridad oportunas y mantener una adecuada trazabilidad dosimétrica, elementos fundamentales para la seguridad del paciente en entornos radiológicos. Además, la falta de protocolos claros, estándares técnicos

consolidados y capacitación del personal puede aumentar el riesgo de errores en la transmisión y procesamiento de la información clínica

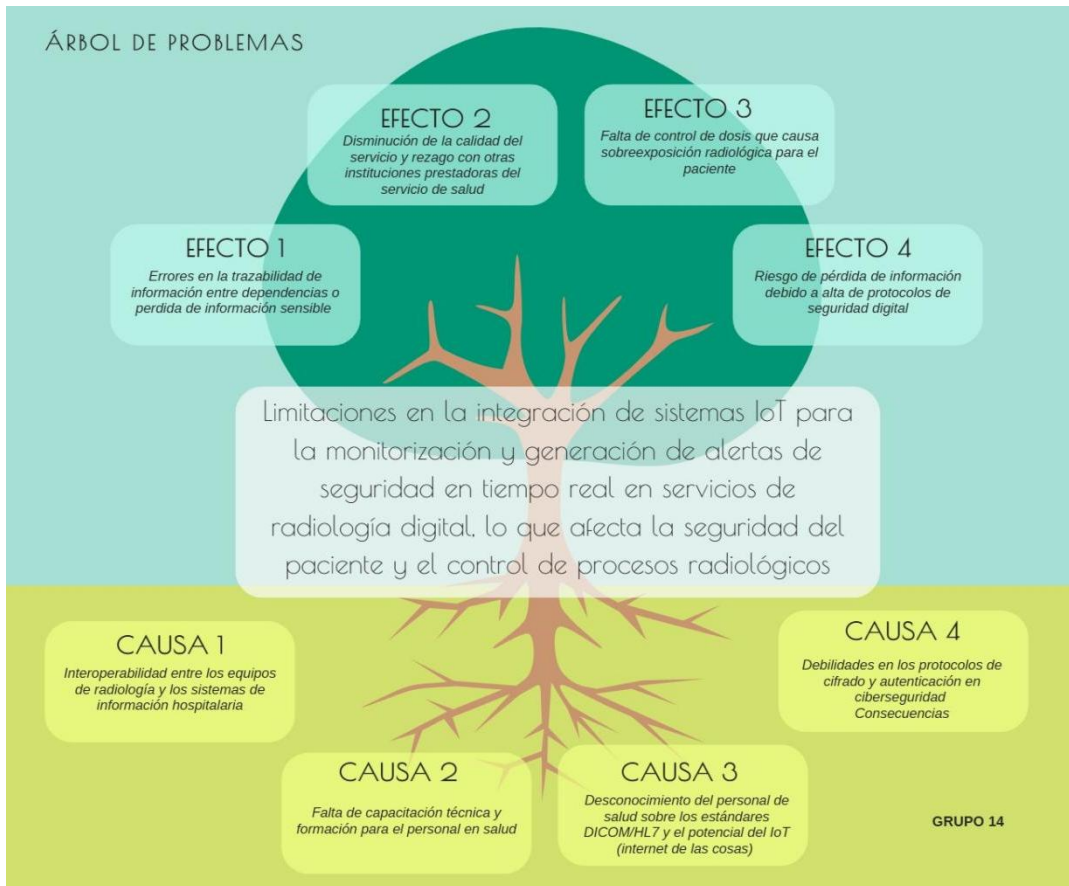
La presente investigación busca responder a la siguiente pregunta: ¿Cómo afectan las limitaciones en la integración de sistemas IoT en radiología digital al monitoreo en tiempo real, la generación de alertas de seguridad y la protección del paciente? Para abordar esta problemática, se desarrolla una revisión rigurosa de la literatura científica y técnica, orientada a identificar, clasificar y analizar dichas limitaciones, así como su impacto en los procesos asistenciales.

Asimismo, se examinan los componentes fundamentales de la arquitectura IoT aplicada a la radiología, incluyendo sensores, redes de comunicación, edge computing, protocolos de intercambio de información y servicios en la nube, con el fin de comprender su relación con la seguridad clínica. A partir de este análisis, se busca no solo describir el estado actual de la integración IoT en radiología, sino también identificar vacíos técnicos y proponer estrategias basadas en evidencia que permitan fortalecer la interoperabilidad, optimizar la eficiencia operativa y garantizar una implementación segura y efectiva en la práctica clínica.

Planteamiento del Problema

Figura 1

Árbol del problema



Nota. El árbol de problema permite delimitar el tema de investigación. Elaboración propia

En el ecosistema de la salud contemporánea, los servicios de radiología digital en instituciones de segundo nivel se enfrentan a un paradigma donde la seguridad del paciente y el control de calidad dependen de la monitorización continua y una gestión precisa de los datos clínicos. Como señalan la European Society of Radiology y la EFRS (2019), la seguridad del paciente en imagenología se sustenta en la disponibilidad inmediata de información, la trazabilidad completa de los procedimientos y la capacidad de identificar oportunamente eventos adversos relacionados con dosis y operatividad técnica. Es así, que

la eficacia clínica en estas unidades está intrínsecamente ligada a la capacidad de procesar información en tiempo real y generar alertas oportunas sobre eventos adversos, niveles de dosis de radiación y la trazabilidad integral de los procedimientos. No obstante, en la práctica asistencial persiste una brecha significativa: la infraestructura tecnológica actual no logra integrar de manera efectiva los sistemas de apoyo, lo que deriva en una gestión reactiva de los riesgos radiológicos en lugar de una supervisión proactiva y automatizada (Sodickson y Khorasani, 2010).

Pese a la incursión del Internet de las Cosas Médicas (IoT) como motor de transformación digital (Cavli, 2025), su implementación en el área de radiología continúa siendo fragmentada y subutilizada. La problemática reside en una inadecuada interoperabilidad semántica y técnica entre los dispositivos médicos, los Sistemas de Información Radiológica (RIS) y las plataformas de registro clínico electrónico (Gil y Viega, 2018). La ausencia de una convergencia plena bajo protocolos estandarizados como DICOM/HL7 impide que el flujo de datos sea fluido, lo que propicia la formación de silos de información. Según Rehani (2017) esta desarticulación tecnológica no solo retrasa la comunicación de datos críticos, sino que invalida la posibilidad de una respuesta inmediata ante anomalías en el control de dosis o fallos en los equipos, afectando directamente la toma de decisiones clínicas.

Las repercusiones de esta integración deficiente impactan de forma multidimensional en la calidad del servicio. Por un lado, la carencia de un ecosistema interconectado expone vulnerabilidades en la ciberseguridad y la integridad de los datos sensibles, aumentando el riesgo de filtraciones y errores en la tramitación de información (Davis, 2021). Por otro lado, la escasa capacitación técnica del personal en el manejo de tecnologías interconectadas exacerba las deficiencias operativas, incrementando la

probabilidad de eventos adversos que comprometen la protección del paciente. Bajo este escenario, el control de procesos se vuelve ineficiente, elevando los costos operativos y reduciendo la competencia de respuesta de la institución con las exigencias de los estándares internacionales de salud.

Desde una perspectiva teórica, este fenómeno se sustenta en la Teoría de los Sistemas Complejos, la cual postula que la falta de cohesión entre los componentes de una red tecnológica incrementa exponencialmente la entropía y el riesgo de falla sistémica. La literatura científica actual subraya que, sin una infraestructura IoT robusta. Franco (2024) identifica como problema central la persistencia de limitaciones críticas en la integración de sistemas IoT para la monitorización y generación de alertas en tiempo real, situación que deteriora la seguridad de nuestro paciente, lo cual debilita la gestión de calidad, esto lleva a comprometer la eficiencia de los servicios de radiología digital en el contexto hospitalario de segundo nivel (AIEA, 2018).

En este contexto, surge la pregunta de investigación: ¿Cómo afectan las limitaciones en la integración de sistemas IoT en radiología digital al monitoreo en tiempo real, la generación de alertas de seguridad y la protección del paciente?

Justificación

La radiología digital se ha convertido en un área clave para el diagnóstico médico moderno, ya que permite una mejor trazabilidad de la información clínica y un control más preciso de los procesos radiológicos. Como señala la European Society of Radiology y la EFRS (2019), la seguridad del paciente en imagenología depende cada vez más de sistemas digitales capaces de monitorear, registrar y alertar en tiempo real sobre variaciones en los parámetros técnicos y dosimétricos.

Sin embargo, la integración de sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT) aún presenta limitaciones que impiden un monitoreo eficiente y la generación de alertas de seguridad. De acuerdo con Sonavane et al., (2023), la interoperabilidad insuficiente genera silos de información, que impiden el flujo continuo y seguro de datos clínicos, afectando los procesos de toma de decisiones y las capacidades de monitoreo. Entre las causas principales de esta problemática se encuentran la falta de interoperabilidad entre los equipos de radiología y los sistemas hospitalarios, la insuficiente capacitación técnica del personal de salud, el desconocimiento de estándares internacionales como DICOM y HL7, y las debilidades en los protocolos de ciberseguridad. Estas deficiencias generan consecuencias directas como errores en la trazabilidad de la información, pérdida de datos sensibles, sobreexposición radiológica en los pacientes y una disminución en la calidad del servicio frente a instituciones que sí han logrado implementar soluciones IoT de manera efectiva.

La literatura especializada confirma que la integración de IoT en radiología puede mejorar la seguridad del paciente, optimizar la calidad del servicio y fortalecer la protección de la información clínica; no obstante, también advierte que la falta de interoperabilidad, capacitación y protocolos de seguridad son barreras recurrentes en la

implementación de estas tecnologías. Estas limitaciones se agravan cuando se consideran los riesgos de ciberseguridad, como advierten Chen et al., (2025) las plataformas radiológicas presentan vulnerabilidades que pueden comprometer la integridad, disponibilidad y confidencialidad de las imágenes médicas, afectando directamente la seguridad del paciente.

Por ello, resulta necesario investigar cómo estas limitaciones afectan el monitoreo en tiempo real, la generación de alertas de seguridad y la protección del paciente, con el fin de proponer estrategias que permitan superar dichas barreras y avanzar hacia servicios radiológicos más seguros y eficientes (Rodríguez, 2025).

Objetivos

Objetivo General

Analizar con base en la revisión documental, las limitaciones en la integración de sistemas IoT en la radiología digital y su impacto en el monitoreo en tiempo real, la generación automatizada de alertas de seguridad y la protección radiológica del paciente.

Objetivos Específicos

Identificar las limitaciones técnicas, operativas, de conectividad, ciberseguridad e interoperabilidad que afectan la integración entre dispositivos IoT, sistemas PACS (Picture Archiving and Communication System), RIS (Radiology Information System) y plataformas dosimétricas en entornos radiológicos digitales.

Caracterizar la arquitectura IoT utilizada en los servicios de radiología digital, incluyendo sensores, edge computing, protocolos de comunicación, plataformas en la nube y su relación con la seguridad del paciente.

Examinar el impacto de las restricciones tecnológicas en la eficiencia del monitoreo continuo, la detección temprana de riesgos, la trazabilidad dosimétrica y la generación oportuna de alertas automáticas en procedimientos radiológicos.

Proponer recomendaciones basadas en la evidencia documental sobre estrategias tecnológicas, operativas y de seguridad, estandarización, IA e infraestructura digital segura, para fortalecer la integración del IoT y mejorar la protección radiológica del paciente.

Marco Teórico

IoT en Salud y Radiología

El Internet de las Cosas IoT, se refiere a los dispositivos físicos interconectados que poseen sensores, software y tecnologías de comunicación que les permiten recopilar, procesar, intercambiar y enviar datos a través de Internet sin necesidad de intervención humana directa. Según Alvear et al., (2017), el IoT integra sistemas electrónicos capaces de percibir su entorno y comunicarse de manera autónoma para facilitar procesos de monitoreo, automatización y toma de decisiones.

En el entorno de la salud, Barreto y Sandoval (2024) señalan que el IoT permite el uso de dispositivos inteligentes, sistemas de vigilancia clínica remota, optimización de diagnósticos y una gestión más eficiente de la información médica.

Esta tecnología transforma los servicios sanitarios al mejorar la accesibilidad, continuidad del cuidado y seguridad del paciente mediante la integración de redes, sensores biomédicos y plataformas de análisis de datos.

Ecosistema IoT en el Entorno Clínico

La digitalización en radiología ha integrado dispositivos IoT capaces de monitorear, procesar y transmitir datos clínicos en tiempo real. Este ecosistema combina sensores, protocolos de comunicación, sistemas de almacenamiento y análisis de datos, garantizando seguridad del paciente, interoperabilidad y eficiencia operativa (Gómez, 2025).

Este ecosistema está compuesto por sensores, redes inalámbricas, protocolos de comunicación, sistemas de almacenamiento en la nube y plataformas que funcionan en conjunto para optimizar el flujo de información y reducir los riesgos asociados al manejo manual de datos radiológicos.

En radiología, estos sistemas registran los valores dosimétricos, para automatizar la estimación de dosis y garantizar la trazabilidad completa del procedimiento, en relación con los lineamientos de la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA, 2018). La integración de IoT facilita la aplicación de recomendaciones dosimétricas de los reportes AAPM 204 y 220, para ajustar las dosis según las características individuales de los pacientes y la complejidad del estudio (Alfonso, 2021).

Sin embargo, este ecosistema tiene grandes retos en ciberseguridad y protección de datos. Los ataques contra sistemas de salud, como reporta Alder (2024) muestran la vulnerabilidad de los sistemas interconectados. Entonces, organizaciones como el Colegio Americano de Radiología y SIIM han establecido lineamientos específicos para proteger dispositivos radiológicos conectados y mitigar riesgos de intrusión, alteración de datos o secuestro de imágenes (Chen et al., 2025).

Arquitectura IoT en Radiología

La arquitectura IoT en radiología se basa en la interacción de componentes como sensores inteligentes, servidores locales (Edge), módulos de comunicación y plataformas en la nube. Los datos de cada adquisición radiológica se capturan automáticamente, se procesan y se integran en sistemas PACS (Picture Archiving and Communication System) y RIS (Radiology Information System) para monitoreo continuo y gestión de dosis (Becerra, 2019).

Los sensores inteligentes en equipos como tomógrafos, arcos en C, equipos de rayos X y dispositivos portátiles, capturan parámetros esenciales del procedimiento, como CTDIvol, DLP, SSDE, geometría del escaneo, proyecciones, tiempos de exposición, temperatura del tubo y estados operativos del equipo, siguiendo los lineamientos de seguridad establecidos por la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA, 2018), que

exige monitoreo permanente de dosis y condiciones de operación para minimizar riesgos derivados de la radiación ionizante.

Paso seguido, los datos capturados pasan a través de nodo de borde, Edge Computing, que analizan la información, siendo esencial para detección temprana de parámetros anómalos, cálculos automáticos de SSDE siguiendo los estándares AAPM 204 y 220, compresión de imágenes, análisis predictivo y verificación de calidad del protocolo (Allende et al., 2016), lo que reduce la latencia, mejora la respuesta y preserva la seguridad al disminuir la transferencia por medio de redes públicas.

A continuación, la información es manejada por módulos de comunicación, los cuales emplean protocolos específicos del entorno médico como DICOM, HL7, MQTT y HTTPS, garantizando interoperabilidad entre equipos y plataformas informáticas. Estos protocolos permiten la integración con sistemas PACS (Picture Archiving and Communication System), RIS (Radiology Information System) y HIS (Hospital Information System), logrando una sincronización automática de datos clínicos, imágenes, reportes de exposición y registros de mantenimiento (Comisión Europea, 2012) y se termina con plataformas en la nube, donde la información se almacena, analiza y correlaciona con IA, implementando algoritmos de aprendizaje profundo (deep learning) para optimizar la planificación del protocolo, prever fallas del equipo, mejorar la detección de patologías y automatizar la gestión de dosis, tal como lo señalan investigaciones recientes en el campo (Molina, 2024).

De igual forma, esta arquitectura necesita de ciberseguridad, por la exposición e los sistemas de imágenes médicas a ataques como ransomware, intrusión de redes o manipulación de datos (Alder, 2024). La interconexión IoT aumenta la vulnerabilidad de los dispositivos radiológicos, hay recomendaciones para proteger dispositivos IoT, PACS e

infraestructuras de nube mediante cifrado, autenticación multifactor, redes segmentadas y detección de anomalías (Chen et al., 2025).

Modelos de Procesamiento de Datos

Edge Computing

Procesa la información directamente en servidores locales cercanos al dispositivo de adquisición, minimizando la latencia, permitiendo alertas inmediatas sobre dosis excesiva y garantizando disponibilidad de datos aún con interrupciones de red. Además, reduce riesgos de exposición a información sensible en el tráfico de internet (Franco, 2024).

Cloud Computing

Permite almacenamiento centralizado, análisis avanzado de grandes volúmenes de datos y auditorías históricas, aunque depende de conectividad y requiere protocolos robustos de seguridad para proteger los datos clínicos (Chen et al., 2025).

Protocolos de Comunicación y Estándares de Interoperabilidad

La implementación de dispositivos IoT en radiología necesita de protocolos de comunicación eficientes que permitan la transmisión de datos clínicos en tiempo real y la integración con los sistemas existentes, como PACS (Picture Archiving and Communication System) y RIS (Radiology Information System).

La interoperabilidad entre dispositivos y sistemas hospitalarios es esencial para garantizar la exactitud de los metadatos DICOM, incluyendo CTDIvol (Computed Tomography Dose Index volumen), DLP y SSDE, y garantizar la trazabilidad de la exposición radiológica (Alvear et al., 2017). Entre los protocolos más utilizados en entornos IoT clínicos se encuentran:

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Protocolo para la transmisión rápida y confiable de mensajes entre sensores y servidores, con baja sobrecarga de red y

soporte para conexiones intermitentes, ideal para entornos hospitalarios donde la latencia debe ser mínima (Alvear et al., 2017).

HTTP (Hypertext Transfer Protocol). Protocolo que permite la interoperabilidad con aplicaciones clínicas y facilita la integración con sistemas de gestión de imágenes y datos de pacientes, asegurando que la información se comparta de manera segura y estandarizada (Becerra, 2019).

CoAP (Constrained Application Protocol). Protocolo para dispositivos con recursos limitados, como microcontroladores y sensores IoT, permitiendo comunicación eficiente y segura en redes hospitalarias con baja capacidad de procesamiento y ancho de banda limitado (Alvear et al., 2017).

La integración de estos protocolos con PACS (Picture Archiving and Communication System) y RIS (Radiology Information System) asegura que los metadatos de cada adquisición de tomografía computarizada se transmitan automáticamente, facilitando el cálculo en tiempo real de SSDE y otros índices de dosimetría personalizados, optimizando la seguridad del paciente y reduciendo la intervención manual (Sodickson y Khorasani, 2010).

Hardware IoT para Procesamiento de Metadatos DICOM en Tiempo Real

El avance de la digitalización en radiología ha permitido integrar dispositivos IoT capaces de procesar metadatos DICOM de forma automática y en tiempo real, mejorando la gestión de dosis y la seguridad del paciente. Estos dispositivos incluyen sensores inteligentes, servidores locales (edge devices) y módulos de comunicación que permiten capturar información de cada adquisición de TC sin intervención manual, garantizando interoperabilidad con sistemas PACS (Picture Archiving and Communication System) y RIS (Radiology Information System). Según Alvear et al., (2017) IoT incluye arquitectura

de sensores, interoperabilidad y transmisión de datos mediante protocolos estándar como MQTT, HTTP y CoAP, lo que permite la integración en flujos de trabajo clínicos digitales.

Asimismo, Becerra (2019) destaca que la automatización mediante IoT en salud favorece el monitoreo remoto y la generación de alertas tempranas, a su vez, Franco (2024) señala que la interoperabilidad entre módulos tecnológicos es crítica para la precisión y continuidad del procesamiento de información clínica.

En radiología, los dispositivos IoT pueden procesar automáticamente los metadatos de DICOM, como el CTDIvol (Computed Tomography Dose Index volumen), DLP y parámetros de adquisición, y calcular en tiempo real el SSDE (Size-Specific Dose Estimate), permitiendo ajustar la dosis individual del paciente para asegurar el cumplimiento del principio ALARA, tan bajo como razonablemente sea posible, (Sodickson y Khorasani, 2010).

El avance de la digitalización en radiología ha permitido integrar dispositivos IoT capaces de procesar metadatos DICOM de forma automática y en tiempo real, mejorando la gestión de dosis y la seguridad del paciente. Según Alvear et al., (2017), IoT incluye arquitectura de sensores, interoperabilidad y transmisión de datos mediante protocolos estándar como MQTT, HTTP y CoAP, lo que permite integrar los flujos de trabajo

Asimismo, Becerra (2019) destaca que la automatización mediante IoT en salud favorece el monitoreo remoto y la generación de alertas tempranas. También, Franco (2024) señala que la interoperabilidad entre módulos tecnológicos es crítica para la precisión y continuidad del procesamiento de información clínica.

En radiología, los dispositivos IoT pueden procesar automáticamente los metadatos de DICOM, como CTDIvol, DLP y parámetros de adquisición, y calcular en tiempo real el

SSDE, permitiendo ajustar la dosis individual del paciente para asegurar el cumplimiento del principio ALARA (Sodickson y Khorasani, 2010).

DICOM. Estándar para almacenamiento, transmisión y gestión de imágenes médicas, asegurando compatibilidad entre dispositivos y sistemas PACS (Picture Archiving and Communication System) (Emergen Research, 2024).

Beneficios del IoT en Radiología

El IoT en radiología tiene diversos beneficios que impactan en la eficiencia y seguridad de los servicios clínicos. Permite el monitoreo en tiempo real, facilitando el ajuste dinámico de la dosis y la generación de alertas inmediatas ante exposiciones excesivas (Mejía y Martín, 2023).

Además, contribuye a la optimización de los flujos clínicos con la automatización de la gestión de imágenes y datos, la integración con sistemas PACS (Picture Archiving and Communication System) y RIS (Radiology Information System), y la reducción de errores humanos (Gómez, 2025). También fortalece la seguridad y trazabilidad por los registros de radiación que garantizan el cumplimiento de normas internacionales de protección radiológica (González, 2016).

IoT en radiología ofrece múltiples beneficios que impactan directamente en la eficiencia y seguridad de los servicios clínicos. Permite el monitoreo en tiempo real, facilitando el ajuste dinámico de la dosis y la generación de alertas inmediatas ante exposiciones excesivas (Mejía y Martín, 2023).

Finalmente, su diseño modular y flexible asegura escalabilidad, con la integración de dispositivos, sensores y sistemas avanzados de análisis, incluyendo IA, que potencian la capacidad diagnóstica y la eficiencia operativa (Trillo et al., 2024).

Sistemas PACS (Picture Archiving and Communication System) o RIS (Radiology Information System) y DICOM

Los servicios de radiología usan sistemas digitales para gestionar imágenes médicas y datos clínicos, tales como:

DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) es el estándar internacional para almacenamiento, transmisión y gestión de imágenes médicas, asegurando compatibilidad entre dispositivos y sistemas PACS (Emergen Research, 2024).

RIS (Radiology Information System) encargado de gestionar la información administrativa y clínica del servicio de radiología, incluyendo programación de estudios, registro de pacientes y generación de informes diagnósticos.

PACS (Picture Archiving and Communication System) que sirve para almacenar, visualizar y distribuir imágenes médicas generadas en diferentes técnicas de diagnóstico.

HL7 (Health Level Seven) que es el estándar para intercambio electrónico de información clínica, permitiendo interoperabilidad entre sistemas hospitalarios, RIS y EHR (Camargo et al., 2015).

Dosimetría en Tomografía Computarizada

Fundamentos de la Dosimetría en TC

La dosimetría en TC se basa en cuantificar la dosis de radiación administrada a los pacientes para garantizar la seguridad. Entre los principales:

CTDI_{vol} (Computed Tomography Dose Index volumétrico). Mide la dosis promedio entregada por el equipo de TC dentro de un volumen estándar de maniquí (16 o 32 cm) y sirve como referencia de salida del equipo (Estévez, 2018).

DLP (Dose-Length Product). Producto del CTDIvol (Computed Tomography Dose Index volumen) por la longitud del estudio, indica la dosis total administrada a lo largo del examen (Estévez, 2018).

Limitaciones del CTDIvol (Computed Tomography Dose Index volumen)

El CTDIvol (Computed Tomography Dose Index volumen) refleja la salida del equipo, pero no la dosis real absorbida por el paciente, ya que no considera el tamaño corporal individual, las variaciones anatómicas de cada paciente y la composición tisular, grasa, músculo y hueso (Estévez, 2018)

En este sentido, estas limitaciones pueden generar errores significativos en la estimación de dosis, especialmente en pacientes pediátricos o con obesidad, donde la densidad tisular influye directamente en la atenuación de los rayos X (Rehani, 2017).

Riesgos Radiológicos

La exposición a radiación ionizante puede causar efectos:

Efectos Estocásticos. Incluyen cáncer y mutaciones genéticas, cuya probabilidad aumenta con la dosis acumulada, aunque sin umbral definido (IAEA, 1994).

Efectos Deterministas. Efectos como dermatitis, cataratas o daño a órganos, que aparecen por encima de un umbral de dosis (González, 2016).

De esta forma, la monitorización precisa de dosis con sistemas automatizados y SSDE es esencial para cumplir con el principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable) y minimizar riesgos (Arias, 2006).

SSDE y Estimación Personalizada de la Dosis

Evolución de los Algoritmos SSDE

La dosimetría en tomografía computarizada ha evolucionado desde métricas genéricas hacia enfoques personalizados basados en la física de la atenuación. Usualmente,

el CTDI_{vol} (Computed Tomography Dose Index volumen) ha sido el índice estándar, calculado mediante maniqués de acrílico de 16 o 32 cm. Sin embargo, este indicador presenta limitaciones, ya que no refleja con precisión la dosis absorbida real por el paciente, pues no se consideran las variaciones de tamaño corporal ni las diferencias en la composición tisular humana (Estévez, 2018).

Ante esta limitación surge el SSDE (Size-Specific Dose Estimate) como método que permite ajustar el CTDI_{vol} (Computed Tomography Dose Index volumen) a las dimensiones reales del paciente. Este enfoque es un gran avance en la optimización de dosis en TC, de acuerdo con los principios internacionales de protección radiológica que promueven la reducción de la exposición innecesaria a radiación ionizante (Agencia Internacional de Energía Atómica, 2018).

Partiendo de este valor se aplican los factores de conversión geométricos (f) para corregir el CTDI_{vol} (Computed Tomography Dose Index volumen) según el tamaño externo del paciente. Sin embargo, este método tiene una deficiencia crítica que ignora la composición interna de los tejidos, grasa, músculo, hueso, lo que limita su precisión en tejidos con densidades variables. Estas variaciones pueden influir significativamente en la atenuación de los rayos X y, por lo tanto, en la dosis realmente absorbida (Rehani, 2017).

Algoritmos SSDE y su Impacto Clínico

Del CTDI_{vol} al SSDE. El Size-Specific Dose Estimate (SSDE) ajusta el CTDI_{vol} (Computed Tomography Dose Index volumen) al tamaño real del paciente usando factores de conversión geométricos (AAPM, 2013). Esto mejora la precisión de la estimación, pero sigue sin considerar la densidad interna de los tejidos (Estévez, 2018).

La transición desde indicadores tradicionales de dosis, como el CTDI_{vol} (Computed Tomography Dose Index volumen), hacia métricas como el SSDE (Size-Specific Dose

Estimate) y el Dw (Water-Equivalent Diameter) es un avance importante en la dosimetría en tomografía computarizada. Este cambio conceptual responde a las recomendaciones de organismos internacionales como la Agencia Internacional de Energía Atómica — AIEA (2018), que enfatizan que la protección radiológica debe centrarse en el paciente, ajustándose a su anatomía, composición y variabilidad morfológica real.

Sin embargo, el SSDE es un avance significativo, pero con la limitación de que solo corrige geometría, sin tener en cuenta la atenuación real de los tejidos, un factor crucial bajo los lineamientos de protección radiológica contextualizada por la AIEA (2018).

Diámetro Equivalente de Agua (Dw) – Reporte AAPM 220. El Reporte AAPM 220 introduce Dw, que combina geometría y atenuación tisular (en HU), permitiendo una estimación más realista de la dosis absorbida. Estudios comparativos muestran que Dw reduce errores hasta un 5% frente a estimaciones basadas solo en CTDI_{vol} (Computed Tomography Dose Index volumen), corrigiendo sobreestimaciones en pacientes obesos o con alta proporción de grasa (Higuera, 2023).

Este indicador reconoce que el cuerpo humano no es homogéneo y que la interacción de la radiación con tejidos depende de su densidad electrónica, un principio reforzado por la normativa internacional de protección radiológica (González, 2016).

La política internacional de protección radiológica, señala que toda estimación de dosis en tomografía computarizada debe fundamentarse en el principio ALARA. La integración del SSDE y el Dw son clave para fortalecer este principio, pues permite comparar dosis entre equipos y centros utilizando parámetros ajustados al tamaño y características reales del paciente, facilita la evaluación precisa de los niveles de referencia diagnósticos (DRL) y mejora los procesos de auditoría de protocolos (Amaya y Muñoz, 2021).

Introducción del Reporte AAPM 204: Diámetro Efectivo (Deff). El reporte AAPM 204 estableció la primera etapa de personalización de la estimación de dosis en TC, al utilizar el diámetro efectivo Deff, para ajustar el DTDIvol en concordancia con el tamaño corporal del paciente. El diámetro efectivo a partir de los diámetros anteroposterior (AP) y lateral (LAT), del paciente, permitiendo una primera aproximación personalizada de la dosis (Estévez, 2018):

Figura 2

Ecuación de Diámetro Efectivo

$$D_{eff} = \sqrt{AP} * LAT$$

Nota. El diámetro efectivo a partir de los diámetros anteroposterior (AP) y lateral (LAT), del paciente, permitiendo una primera aproximación personalizada de la dosis (Estévez, 2018)

Sin embargo, el método basado únicamente en la geometría externa del paciente presenta limitaciones críticas: no toma en cuenta la composición tisular interna, lo que puede provocar errores de hasta un 30% en la estimación de dosis en pacientes obesos, debido a la menor atenuación de la grasa en comparación con el tejido magro (Higuera, 2023).

Evolución hacia el Reporte AAPM 220

Para mejorar la precisión en la estimación de dosis en TC, el Reporte AAPM 220 introdujo el concepto de diámetro equivalente de agua (Dw), el cual incorpora no solo la dimensión geométrica del paciente, sino también la atenuación promedio de los tejidos medida en unidades Hounsfield (HU), lo que permite obtener una estimación más realista de la absorción de radiación en el cuerpo humano (AAPM, 2020).

El D_w se calcula a partir del área de la región de interés (Aroi) y la atenuación media de los tejidos:

Figura 3

Diámetro equivalente en agua

$$D_W = 2 * \sqrt{\frac{A_{ROI}}{\pi}} * \left(1 + \frac{HU}{1000}\right)$$

Nota. El diámetro equivalente ponderado (DW) se calcula a partir del área del ROI transversal del paciente (AROI) y el valor medio de atenuación expresado en unidades Hounsfield (HU) (AAPM, 2014).

Este parámetro ha demostrado reducir errores de estimación hasta un 5%, corrigiendo la sobrestimación de dosis en pacientes con baja densidad tisular, como ocurre en pacientes obesos o con alta proporción de grasa (Higuera, 2023).

Automatización y Deep Learning en la Estimación de SSDE

La estimación de D_w ha evolucionado desde cálculos manuales hacia procesos automatizados integrados en flujos de trabajo en tiempo real. Los algoritmos tradicionales utilizan imágenes de planificación (topogramas o scout views) y segmentación por gradientes de intensidad y umbrales adaptativos para separar al paciente del aire, logrando una precisión del 4% en menos de 10 segundos (Molina, 2024).

Figura 4

Ecuación del estimador de dosis específica por tamaño (SSDE)

$$SSDE_Z = CTDI_{VOLZ} * f(D_{W,Z})$$

Nota. El estimador de dosis específica por tamaño (SSDE) se calcula multiplicando el índice de dosis volumétrico en el eje Z (CTDIVOL,Z) por el factor de corrección dependiente del diámetro equivalente ponderado del paciente (f(DW,Z)) (AAPM, 2014).

Métodos Convencionales

Emplean imágenes topográficas (socut views) para determinar el tamaño y densidad antes de la adquisición. Además, emplean segmentación por gradientes de intensidad y umbrales adaptativos ($T_0 = \text{media}(\text{HU})/2.5$) para separar al paciente del aire, alcanzando una precisión del 4% en menos de 10 segundos (Estévez, 2018).

Precisión en Pacientes Pediátricos vs. Obesos

Población Pediátrica

Los tejidos en desarrollo presentan alta radiosensibilidad; incluso pequeños errores de segmentación pueden generar desviaciones significativas en la dosis. El uso de D_w asegura que la dosis sea mínima, cumpliendo con el principio ALARA, considerando la baja densidad ósea y alta proporción de agua en neonatos (Estévez, 201) y El diámetro efectivo (D_{eff} , AAPM 204) era insuficiente para representar con exactitud estas diferencias tisulares; D_w permite un cálculo más realista de la absorción (AAPM, 220).

Pacientes Obesos

Asimismo, el reto es la penetración del haz y la dispersión. Los algoritmos de Deep Learning gestionan el truncamiento de la imagen, donde el contorno del paciente se corta en la pantalla. Algoritmos de Deep Learning predicen la anatomía faltante, permitiendo calcular un SSDE preciso y superando las limitaciones de los métodos manuales o basados

en Deff (Higuera, 2023). La corrección por tejido adiposo es crítica, ya que la grasa atenúa menos que el tejido magro; Dw ajusta la dosis para reflejar la densidad real del abdomen, evitando sobreestimaciones (Estévez, 2018).

Entonces, la evolución desde Deff hacia Dw y su integración con IA son un avance importante en la personalización de la dosimetría, optimizando la exposición a radiación, reduciendo errores y mejorando la seguridad de pacientes, especialmente pediátricos y obesos, de acuerdo con los estándares internacionales de protección radiológica y el principio ALARA (Agencia Internacional de Energía Atómica, 2018).

Impacto Clínico: Comparación entre CTDIvol y SSDE

El CTDIvol (Computed Tomography Dose Index volumen) es el índice estándar de exposición en TC, pero representa únicamente la salida de radiación del equipo, calculada a partir de maniqués de acrílico de 16 o 32 cm, sin considerar el tamaño ni la composición del paciente (Estévez, 2018). Esto genera discrepancias significativas en la estimación real de dosis absorbida, especialmente en pacientes pediátricos u obesos.

Por otra parte, el SSDE ajusta el CTDIvol (Computed Tomography Dose Index volumen) según las dimensiones del paciente y en la versión AAPM 220, incorpora la densidad tisular mediante el diámetro equivalente de agua (Dw), reduciendo errores de hasta un 30% en pacientes con exceso de tejido adiposo (Estévez, 2018). Además, la dosis estimada por CTDIvol (Computed Tomography Dose Index volumen) puede sobrestimar la dosis real en pacientes obesos y subestimar en pacientes pequeños, mientras que el SSDE ofrece una correlación mucho más precisa con la absorción real de radiación (Rehani, 2017).

Asimismo, la integración de hardware IoT automatiza la obtención de SSDE en tiempo real, evitando errores humanos en la estimación de dosis, mejorando la eficiencia

del flujo de trabajo y fortaleciendo la seguridad radiológica y la trazabilidad de los datos clínicos (Gómez, 2025), lo que facilita la trazabilidad de la exposición radiológica, creando registros de dosis precisos para auditorías y cumplimiento de normativa internacional (IAEA, 2016).

Diversas investigaciones que comparan CTDIvol vs SSDE destacan diferencias significativas en pacientes pediátricos, donde la baja densidad ósea puede subestimar la dosis real si se considera solo CTDIvol (Rehani, 2017). Y en pacientes obesos, CTDIvol (Computed Tomography Dose Index volumen) sobreestima la dosis debido a la baja atenuación de grasa, un error que Dw corrige con precisión (Estévez, 2018).

Entonces, la implementación de SSDE con Dw, combinada con sistemas automatizados de monitoreo de dosis, permite una gestión más segura de la radiación, optimizando la protección del paciente y la trazabilidad de la exposición radiológica

IA en Dosimetría

La IA tiene aplicación en radiología para automatizar procesos de análisis de imágenes y cálculo de dosis, en tomografía computarizada al automatizar procesos de análisis, estimación y corrección de dosis, fortaleciendo la precisión y la seguridad radiológica. Según Allende et al., (2016) demostraron que el cálculo de dosis basado en parámetros específicos del paciente, como el diámetro efectivo según el Reporte AAPM 204, puede ser optimizado mediante algoritmos que ajustan automáticamente el índice de dosis en función de la anatomía real del usuario.

Alvear et al., (2017) explican cómo los sistemas inteligentes pueden reconocer patrones en imágenes clínicas y transmitir datos dosimétricos en tiempo real, permitiendo una gestión más eficiente y automatizada. Como señalan Amaya y Muñoz (2021) que

facilita la comparación sistemática entre servicios y equipos, reduciendo variabilidad y asegurando coherencia con estándares internacionales.

Asimismo, Arias (2006) resalta que el fortalecimiento de la protección radiológica depende de herramientas capaces de optimizar la exposición sin comprometer la calidad diagnóstica, objetivo que la IA posibilita al automatizar cálculos complejos, identificar desviaciones dosimétricas y apoyar la toma de decisiones clínicas basadas en datos:

Deep Learning

Las Redes neuronales convolucionales (CNN), como U-Net o DeepLabv3+, generan máscaras corporales pixel-perfectas, reduciendo el error al 2% y operando en tiempo real (<1s) en plataformas de fabricantes (Molina, 2024).

Además, estos sistemas permiten gestionar problemas complejos como el truncamiento de imágenes en pacientes obesos, prediciendo la anatomía faltante y mejorando la precisión del cálculo de SSDE (Higuera, 2023).

Ciberseguridad en Sistemas Radiológicos

El ecosistema IoT en salud enfrenta riesgos de ciberseguridad, que pueden comprometer la confidencialidad, integridad y disponibilidad de datos clínicos. Se destacan las vulnerabilidades en PACS y RIS que exponen imágenes y datos de pacientes (Davis, 2021), posibles manipulaciones de imágenes mediante IA y ataque a plataformas conectadas que afectan continuidad del servicio (Caparoso, 2023).

Es así, que. es necesario implementar medidas de seguridad como cifrado de datos, autenticación de usuarios, control de accesos y monitoreo de redes para proteger la información médica (European Society of Radiology, 2019).

Normativa en Colombia

El uso de equipos que generan radiación ionizante está controlado por el Ministerio de Salud y Protección Social.

En Colombia, el uso de equipos generadores de radiación ionizante en el área médica está regulado por el Ministerio de Salud y Protección Social, (2025), entidad encargada de establecer los lineamientos para garantizar la seguridad del paciente y del personal ocupacionalmente expuesto a radiación. La Resolución 1811 de 2025 establece los requisitos técnicos y administrativos para la prestación de servicios de protección radiológica, incluyendo la implementación de programas de garantía de calidad, controles dosimétricos y verificación periódica de los equipos emisores de radiación (Ministerio de Salud y Protección Social, 2025).

Asimismo, la Resolución 3100 de 2019 determina los estándares y criterios de habilitación de los servicios de salud en Colombia, exigiendo que los servicios de imágenes diagnósticas cumplan con condiciones específicas de infraestructura, talento humano y seguridad radiológica (Ministerio de Salud y Protección Social, 2019). Estas disposiciones buscan garantizar que los procedimientos de tomografía computarizada (TC) se realicen bajo estándares de calidad y seguridad, reduciendo riesgos asociados a la exposición a radiación ionizante.

Regulaciones Internacionales y Principio ALARA

La protección radiológica en Colombia se fundamenta en principios internacionales adoptados por organismos como la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA) y la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Entre estos principios se destaca el principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable), el cual establece que las dosis

de radiación deben mantenerse tan bajas como razonablemente sea posible, considerando factores técnicos, económicos y sociales (ICRP, 2007).

Además, este principio se articula a través de tres fundamentos esenciales: la justificación del procedimiento, la optimización de la protección y la limitación de dosis en trabajadores ocupacionalmente expuestos. En el contexto colombiano, estas recomendaciones internacionales son incorporadas dentro del marco normativo nacional y orientan los programas de control de calidad y dosimetría en tomografía computarizada (Ministerio de Salud y Protección Social, 2025).

Por otra parte, la optimización de dosis en TC es especialmente relevante, ya que este estudio representa una de las principales fuentes de exposición médica a radiación ionizante a nivel mundial (Agencia Internacional de Energía Atómica, 2018). Por esta razón, la implementación de estrategias de control de dosis constituye un elemento fundamental para garantizar la seguridad radiológica en los servicios de imágenes diagnósticas.

Niveles de Referencia para Diagnóstico (DRL) en Colombia

Los Niveles de Referencia para Diagnóstico (DRL) constituyen una herramienta fundamental para la optimización de dosis en estudios de imagen diagnóstica. Estos niveles permiten comparar las dosis administradas en un servicio con valores de referencia establecidos a nivel nacional o internacional, con el fin de identificar desviaciones y promover la optimización (AIEA, 2018).

En Colombia, diversas investigaciones han abordado la determinación de DRL en tomografía computarizada mediante indicadores como el CTDIvol (Computed Tomography Dose Index volumen) y el DLP, contribuyendo al fortalecimiento de la cultura de seguridad

radiológica y al desarrollo de estrategias de control de dosis en los servicios de imágenes diagnósticas (Amaya y Muñoz, 2021).

No obstante, aunque el país ha avanzado en estudios para la determinación de estos niveles de referencia, aún se requiere su consolidación como estándar obligatorio dentro del sistema de habilitación de los servicios de salud y de los programas de control de calidad, con el fin de garantizar su aplicación sistemática dentro de la práctica clínica (Gómez, 2025).

Asimismo, la implementación de DRL con la normativa nacional responde al compromiso de mejorar la calidad diagnóstica y minimizar riesgos radiológicos en los pacientes. La implementación efectiva de los DRL exige monitoreo continuo, calibración de equipos, registro de dosis y auditorías periódicas dentro de los programas de protección radiológica.

Metodología

La presente investigación analiza las limitaciones en la integración de sistemas de Internet de las Cosas (IoT) en la radiología digital y su impacto en el monitoreo en tiempo real, la generación de alertas automáticas y la protección radiológica del paciente. El estudio se desarrolla mediante un enfoque cualitativo, de revisión, análisis e interpretación de literatura científica, técnica y normativa. Según Hernández et al., (2014), el enfoque cualitativo permite comprender fenómenos desde la interpretación del investigador, mediante métodos flexibles y no estandarizados que facilitan la exploración profunda del contexto.

Enfoque de Investigación

El estudio adopta un enfoque cualitativo, orientado a describir, interpretar y comprender la integración del IoT en radiología digital, sus limitaciones técnicas, operativas y de ciberseguridad, y su relación con la seguridad del paciente y la dosimetría en tiempo real. Este enfoque facilita el análisis de perspectivas, conceptos y tendencias reportadas por autores, organismos internacionales y literatura especializada.

Tipo y Diseño de Estudio

Se desarrolla un estudio descriptivo, exploratorio y documental, basado en una revisión literaria sistemática y comparativa. El diseño busca:

Caracterizar tecnologías IoT aplicadas a radiología.

Identificar sus limitaciones e implicaciones.

Analizar su impacto sobre la seguridad del paciente y la emisión automatizada de alertas.

El carácter exploratorio permite abordar brechas tecnológicas emergentes, mientras que el enfoque descriptivo organiza los hallazgos para comprender tendencias, retos y patrones críticos.

Recolección de Información

La información se obtuvo con búsquedas en bases de datos y repositorios científicos tales como:

PubMed

Scopus

ScienceDirect

IEEE Xplore

SciELO

Google Académico

Researchgate

Biblioteca virtual UNAD

Documentos técnicos de organismos especializados como: AIEA, AAPM, ESR, OMS y Minsalud.

Se usaron descriptores y palabras clave como: IoT, radiología digital, seguridad del paciente, dosimetría, automatización de alertas, ciberseguridad, interoperabilidad, PACS (Picture Archiving and Communication System) o RIS (Radiology Information System) y edge computing.

Criterios de Inclusión

Publicaciones entre 2016 y 2026.

Artículos científicos, revisiones, normas, guías y reportes técnicos sobre IoT en salud.

Literatura relacionada con dosimetría, ciberseguridad, automatización, PACS-RIS, IA y protección radiológica.

Criterios de Exclusión

Documentos no relacionados con radiología digital o IoT aplicado al monitoreo dosimétrico.

Literatura sin rigor técnico o científico.

Categorías de Análisis

Se construyeron las siguientes categorías temáticas para organizar el análisis:

Interoperabilidad y conectividad IoT

Arquitecturas IoT, edge computing y protocolos de comunicación

Integración con PACS, RIS y sistemas dosimétricos

Protección radiológica y seguridad del paciente

Monitoreo en tiempo real y automatización de alertas

Ciberseguridad y vulnerabilidades digitales

Fases Metodológicas

Fase 1. Búsqueda y Selección de Fuentes

Se establecieron criterios de búsqueda, descriptores y operadores booleanos. Se recopilaron artículos, documentos técnicos y normativas de 2006–2025.

Fase 2. Organización y Clasificación Temática

La información fue depurada, seleccionada según relevancia y clasificada en categorías IoT, radiología, dosimetría, ciberseguridad, interoperabilidad, etc.

Fase 3. Análisis, Síntesis e Interpretación

Se realizó un análisis cualitativo para identificar patrones, coincidencias, brechas tecnológicas, riesgos, limitaciones y tendencias. Se integraron los hallazgos para comprender el impacto del IoT en la seguridad del paciente y la gestión radiológica.

Fase 4. Integración de Resultados y Recomendaciones

A partir de la síntesis se elaboraron recomendaciones orientadas a mitigar limitaciones, mejorar la interoperabilidad y fortalecer la protección radiológica mediante IoT.

Tabla 1

Fases de la investigación

Fases	Descripción
Fase 1: Búsqueda y selección de fuentes	Definición de criterios, palabras clave y operadores booleanos. Recopilación de artículos, normas y reportes técnicos (2016–2026).
Fase 2: Organización y clasificación temática	Depuración, análisis de relevancia, organización por categorías (IoT, dosimetría, ciberseguridad, etc.).
Fase 3: Análisis, síntesis e interpretación	Análisis cualitativo, síntesis de tendencias, identificación de brechas tecnológicas, riesgos y coincidencias.
Fase 4: Integración de resultados y recomendaciones	Elaboración de conclusiones y recomendaciones para mejorar la integración del IoT y fortalecer la seguridad del paciente.

Nota. Elaboración propia

Análisis de Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la ruta metodológica de la presente investigación, integrando los hallazgos provenientes de la revisión documental y su impacto en la integración de sistemas IoT aplicados a la radiología digital. Las limitaciones de la integración IoT en radiología se presentan:

Captura y Adquisición de Datos

Los sensores utilizados para medir temperatura del tubo, corriente del generador, niveles de radiación o posicionamiento mecánico presentan diferencias por fabricante, falta de calibración estandarizada y variabilidad en precisión metrológica, lo que genera inconsistencias iniciales que afectan la calidad del dato. Como señalan Becerra (2019) y la AIEA (2018), estas imprecisiones comprometen la trazabilidad dosimétrica y la calidad radiológica.

Procesamiento Preliminar y Edge Computing

La mayoría de sistemas IoT hospitalarios no incorporan procesamiento local, lo que incrementa la dependencia de la nube y genera retrasos significativos como latencia en la detección de fallos, limitación en alertas predictivas y procesamiento tardío de parámetros variables (Barreto y Sandoval, 2024). Además, Sivanagaraju y Kumar (2025) subrayan que la ausencia de edge computing impide la detección temprana de anomalías en equipos como TAC, RM y fluoroscopia.

Transmisión y Comunicación entre Sistemas

Las fallas más frecuentes son la incompatibilidad entre protocolos propietarios y abiertos, congestión por alto tráfico de imágenes, redes hospitalarias obsoletas y pérdida o corrupción de paquetes de datos (Camargo et al., 2015). Además, la Unión Europea (2012) destaca que la interoperabilidad deficiente afecta la sincronización diagnóstica y la

consistencia del registro clínico. Asimismo, los recientes ciberataques en salud muestran que las interrupciones comprometen directamente la continuidad operativa en radiología (Alder, 2024; Caparroso, 2023).

Integración, Almacenamiento y Trazabilidad Dosimétrica

Los problemas identificados según Sodickson y Khorasani (2010) son la dificultad para relacionar automáticamente los datos de sensores con estudios almacenados, la falta de estandarización en metadatos IoT y las inconsistencias entre DICOM, HL7 y FHIR. Según Estévez (2018), estas brechas afectan la vigilancia longitudinal y el cumplimiento de niveles de referencia diagnósticos (NRD).

Generación de Alertas y Respuesta Automática

Se generan de forma tardía varias alertas de dispositivos IoT por la baja calidad del dato, la latencia por ausencia de edge computing, fallos de integración IoT–PACS, falta de algoritmos predictivos y vulnerabilidades de ciberseguridad. La ESR y EFRS (2019) resaltan que la detección temprana es indispensable para prevenir sobreexposición y fallas mecánicas. Sin embargo, como Fernández et al. (2020) demuestra que los accesos no autorizados pueden incluso alterar la activación automática de alarmas.

Limitaciones Identificadas en la Integración IoT en Radiología

La literatura científica enseña que la integración de IoT en radiología tiene limitaciones estructurales y tecnológicas repetidas. La interoperabilidad insuficiente entre equipos de distintos fabricantes constituye una de las principales barreras, especialmente cuando no se implementan de manera completa estándares como DICOM, HL7 o FHIR, lo que dificulta la integración entre dispositivos y sistemas clínicos (Sonavane et al., 2023).

Asimismo, la baja uniformidad en los protocolos de red y la coexistencia de arquitecturas heterogéneas limitan la comunicación fluida entre sensores, sistemas PACS

(Picture Archiving and Communication System) o RIS (Radiology Information System) y plataformas analíticas (Camargo et al., 2015). Igualmente, el ancho de banda limitado y la infraestructura hospitalaria obsoleta generan retrasos en la transmisión de datos críticos, afectando la oportunidad del monitoreo (Barreto y Sandoval, 2024). Esta situación se agrava por la dependencia de sistemas legacy, los cuales restringen la escalabilidad y modernización tecnológica (Casillo et al., 2024).

Finalmente, los riesgos de ciberseguridad, incluyendo vulnerabilidades en dispositivos IoT y redes inalámbricas, representan una amenaza directa para la integridad de los datos clínicos y dosimétricos (Caparroso, 2023; Chen et al., 2025). En conjunto, estas limitaciones reducen la precisión del monitoreo en tiempo real y afectan la generación oportuna de alertas críticas.

Arquitectura IoT en Radiología Digital

La arquitectura IoT en radiología se estructura en múltiples capas funcionales que permiten la captura, transmisión, procesamiento y visualización de datos clínicos. La capa de percepción incluye sensores biomédicos, dosímetros digitales y dispositivos ambientales encargados de recolectar variables críticas (Becerra, 2019). La capa de red integra tecnologías como WiFi hospitalaria, Bluetooth Low Energy (BLE) y protocolos de comunicación como MQTT o CoAP, diseñados para optimizar la transmisión de datos (Camargo et al., 2015). En la capa de procesamiento se combinan servidores locales, soluciones de edge computing y plataformas en la nube, que permiten el análisis de grandes volúmenes de información (Sivanagaraju y Kumar, 2025) y la capa de aplicación que comprende sistemas como PACS (Picture Archiving and Communication System) o RIS (Radiology Information System) y dashboards clínicos, donde se visualizan los datos y se gestionan las alertas (Davis, 2021).

El análisis evidencia que las principales fricciones se presentan en las capas de red y procesamiento, donde la falta de estandarización, la latencia y la pérdida de paquetes de datos afectan la sincronización de la información y disminuyen la capacidad de respuesta del sistema (Casillo et al., 2024).

Eficacia de las Métricas Avanzadas en Seguridad del Paciente

El uso de métricas avanzadas en sistemas IoT permite mejorar la evaluación del desempeño en seguridad radiológica. Indicadores como la tasa de alarmas válidas (True Positive Rate), la latencia de transmisión, la tasa de alarmas no atendidas y los modelos predictivos basados en machine learning han demostrado aumentar la precisión en la detección de eventos adversos (Sivanagaraju y Kumar, 2025).

Además, estas métricas favorecen la trazabilidad de eventos críticos y la optimización de la dosis, contribuyendo a una mejor gestión del riesgo radiológico (Rehani, 2017). No obstante, su eficacia se ve limitada cuando el ecosistema IoT carece de estandarización, interoperabilidad y una arquitectura robusta, lo que reduce la confiabilidad de los análisis y la capacidad predictiva del sistema (Sonavane et al., 2023).

Impacto de IoT en el Monitoreo de Alarmas

La implementación de IoT mejora el monitoreo de equipos y pacientes en entornos radiológicos, permitiendo una supervisión continua de variables críticas como temperatura, vibración, consumo energético y parámetros fisiológicos (Mejía y Martín, 2023). Estos sistemas facilitan la detección temprana de fallos en equipos como tomógrafos y resonadores, contribuyendo a reducir interrupciones operativas y riesgos clínicos (Rodríguez et al., 2023).

También, fortalecen la seguridad del paciente mediante alertas automatizadas ante alteraciones fisiológicas, como cambios en la oxigenación o arritmias, lo que mejora la

capacidad de respuesta clínica (European Society of Radiology y EFRS, 2019). Sin embargo, la efectividad de estas alertas depende directamente de la calidad de la infraestructura tecnológica, ya que problemas como la latencia, la congestión de red y la falta de interoperabilidad pueden generar alertas tardías o incompletas (Casillo et al., 2024).

Impacto Global en el Monitoreo en Tiempo Real y la Protección del Paciente

La evidencia científica demuestra que las limitaciones identificadas en la integración IoT repercuten sobre la seguridad radiológica y el desempeño clínico en alertas tardías ante fallas de dosis, sobrecalentamiento o desviaciones técnicas. Rehani (2017) señala que la falta de sistemas automáticos de seguimiento dosimétrico genera retrasos críticos en la detección de desviaciones, aumentando el riesgo de exposición excesiva.

Asimismo, la información incompleta para el radiólogo durante la interpretación, la European Society of Radiology y la EFRS (2019) destacan que la ausencia de datos integrados en tiempo real limita la toma de decisiones durante la lectura de imágenes, afectando la seguridad del paciente. Además, la AIEA (2018) advierte que las fallas en la transmisión y trazabilidad de datos radiológicos pueden derivar en repetición innecesaria de exámenes y mayor dosis acumulada.

También, Davis (2021) muestra que la vulnerabilidad de los sistemas PACS afecta la disponibilidad operativa, generando interrupciones que comprometen el flujo diagnóstico. Además, Shih et al. (2011) demuestran que la ausencia de automatización en la recolección y análisis de índices de dosis dificulta la identificación temprana de valores anómalos. Estos hallazgos responden a la necesidad de transitar hacia infraestructuras interoperables, seguras y auditables, apoyadas en estándares técnicos robustos, tal como recomiendan el ACR-SIIM (Chen et al., 2025) y la Comisión Europea (2012).

Las limitaciones del IoT en salud radiológica son barreras técnicas y operativas ampliamente documentadas en la literatura. La evidencia de Sonavane et al. (2023) y Barreto y Sandoval (2024) demuestra que la falta de interoperabilidad y la heterogeneidad tecnológica continúan siendo la restricción más crítica para integrar dispositivos y sistemas en entornos clínicos.

Asimismo, la dependencia del procesamiento en la nube, señalada por Casillo et al. (2024) y Cavli (2025), introduce latencias que afectan el monitoreo en tiempo real, limitando la capacidad de respuesta inmediata ante riesgos radiológicos.

Además, los sensores IoT utilizados en salud no siempre cumplen los estándares de precisión requeridos en escenarios radiológicos, como advierten Becerra (2019) y Alvear et al. (2017), lo que compromete la estabilidad y confiabilidad de los datos. La situación se agrava con las vulnerabilidades de ciberseguridad, donde Caparoso (2023), Alder (2024) y Chen et al. (2025) evidencian que ataques recientes a infraestructuras hospitalarias comprometen la integridad de la información dosimétrica y de los sistemas conectados a PACS (Picture Archiving and Communication System) o RIS (Radiology Information System).

Asimismo, la falta de integración efectiva entre PACS (Picture Archiving and Communication System) o RIS (Radiology Information System) y IoT (Internet of Things), según Davis (2021), limita la trazabilidad continua del paciente, dificultando la reconstrucción segura de sus historiales de dosis. Finalmente, la literatura coincide en que las alertas clínicas automatizadas sólo funcionan de manera eficiente cuando se emplean modelos híbridos basados en edge computing, como lo demuestran Sivanagaraju y Kumar (2025) y Najjar (2023), que resaltan que este enfoque reduce la latencia y mejora la fiabilidad del monitoreo radiológico en tiempo real.

Los resultados evidencian que IoT aporta capacidades avanzadas para el monitoreo en tiempo real y la seguridad del paciente, pero su impacto depende de factores estructurales. La estandarización es un elemento clave, ya que la ausencia de protocolos uniformes afecta la interoperabilidad y compromete la consistencia de las alertas (Comisión Europea, 2012; Sonavane et al., 2023).

Además, las arquitecturas escalables son indispensables para soportar grandes volúmenes de datos en tiempo real; la falta de infraestructura adecuada limita significativamente el potencial del IoT en radiología (Casillo et al., 2024). También, la ciberseguridad es relevante, pues las vulnerabilidades en sistemas conectados pueden comprometer tanto la información clínica como la seguridad del paciente, lo que exige la implementación de medidas como cifrado, autenticación robusta y segmentación de redes (Chen et al., 2025).

En síntesis, el valor agregado del IoT trasciende la automatización de alertas, de una gestión de riesgos reactiva a una proactiva y sistematizada, pues permite la creación de ecosistemas inteligentes capaces de anticipar riesgos, optimizar procesos y mejorar la toma de decisiones clínicas en entornos radiológicos complejos.

Contradicciones entre Autores

El análisis documental evidencia que no existe una contradicción directa entre los autores respecto a la existencia de limitaciones en la integración del IoT en radiología, limitaciones significativas; no obstante, las problemáticas que priorizan varían según la naturaleza del análisis y los escenarios evaluados..

Mientras Sonavane et al. (2023) y Barreto y Sandoval (2024) priorizan la interoperabilidad como la principal barrera estructural, Camargo et al. (2015) enfatizan más las limitaciones de red y comunicación, enfocándose en la infraestructura tecnológica. De

igual forma, en ciberseguridad, Davis (2021) y Caparroso (2023) destacan fallos operativos reales en sistemas PACS (Picture Archiving and Communication System), mientras que Chen et al. (2025) y Alder (2024) adoptan un enfoque más preventivo, centrado en amenazas emergentes y recomendaciones de protección.

Igualmente, al revisar la literatura sobre ciberseguridad, también se encuentran diferencias en el enfoque. Mientras Davis (2021) y Caparroso (2023) documentan fallos operativos reales en sistemas PACS (Picture Archiving and Communication System), evidenciando vulnerabilidades que ya han sido explotadas o que representan riesgos inmediatos para la integridad de los datos diagnósticos, otros autores como Chen et al. (2025) y Alder (2024) adoptan una perspectiva más prospectiva y preventiva. Estos últimos se centran en identificar amenazas emergentes y en proponer lineamientos de protección basados en escenarios futuros, antes de que los riesgos se materialicen en incidentes.

Entonces, al realizar el análisis comparativo de la literatura, se evidenció que no existe una contradicción entre los autores; por el contrario, las diferencias observadas responden a variaciones en el enfoque metodológico. Mientras algunos investigadores se centran en documentar fallas operativas reales identificadas en entornos clínicos, otros orientan sus estudios hacia la evaluación de riesgos potenciales o estructurales que podrían comprometer la seguridad del paciente en escenarios futuros. Esta diversidad de perspectivas enriquece la comprensión del problema y permite una visión más integral de los desafíos asociados a la integración de sistemas IoT en radiología.

Tabla 2*Recomendaciones para fortalecer la integración IoT basadas en la evidencia*

Categoría	Limitaciones	Impacto	Recomendaciones basadas en evidencia
Interoperabilidad	Falta de compatibilidad entre dispositivos IoT, PACS, RIS y plataformas dosimétricas	Pérdida de trazabilidad, fallas en transmisión de datos, alertas incompletas	Adoptar estándares internacionales como HL7, FHIR, DICOMweb y MQTT. Implementar gateways de interoperabilidad que integren sensores heterogéneos. Exigir a proveedores el cumplimiento de estándares abiertos (Barreto y Sandoval, 2024; Cavli, 2025).
Infraestructura y Conectividad	Redes inestables, baja capacidad de ancho de banda, dependencia excesiva de la nube	Retrasos en el monitoreo en tiempo real y limitación en la detección temprana de fallos	Modernizar redes hospitalarias hacia WiFi6 o Ethernet dedicado. Implementar edge computing para procesar datos localmente. Utilizar redundancia de red y balanceo de carga para garantizar disponibilidad (Franco, 2024; Sivanagaraju y Kumar, 2025).
Ciberseguridad	Exposición a ataques, fallos de autenticación, brechas de acceso	Riesgo de manipulación de datos dosimétricos y alteración del funcionamiento del equipo radiológico	Aplicar cifrado extremo a extremo para sensores y plataformas. Integrar firewalls, segmentación de red y autenticación multifactor. Realizar pruebas de penetración periódicas y auditorías de seguridad (Alder, 2024; Chen et al., 2025; Caparros, 2023).
Limitaciones Técnicas del IoT	Sensores de baja precisión, limitaciones de batería, protocolos propietarios	Datos imprecisos que afectan alertas de seguridad y monitoreo del equipo	Seleccionar sensores con certificación médica y alta resolución. Utilizar dispositivos IoT con actualizaciones OTA (Over-The-Air). Estandarizar protocolo de comunicación para todos los

Categoría	Limitaciones	Impacto	Recomendaciones basadas en evidencia
Gestión Operativa y Capacitación	Personal sin formación en IoT, PACS, RIS o plataformas dosimétricas	Uso limitado de las herramientas disponibles y baja detección de riesgos	sensores (Sánchez, 2019; Casillo et al., 2024). Programas de capacitación continua para personal clínico y técnico. Protocolos de respuesta ante alertas automatizadas (Sodickson y Khorasani, 2010; Camargo et al., 2015).
Arquitectura IoT	Falta de planificación en la integración y ausencia de edge computing	Procesamiento lento y dependencia total del servidor en la nube	Diseñar arquitectura híbrida (edge + cloud). Usar microcontroladores con capacidad de análisis local de datos. Implementar dashboards de monitoreo centralizado (Franco, 2024; Sivanagaraju y Kumar, 2025).
Estandarización y Gobernanza de Datos	Inconsistencia en formatos y falta de políticas de gestión	Dificultad para analizar registros dosimétricos y estados del equipo	Definir políticas claras de gestión de datos en radiología digital. Implementar metadatos estandarizados para todos los equipos. Integrar auditorías.
IA y Analítica Predictiva	Falta de herramientas para predicción de fallos o análisis dosimétrico	Mayor probabilidad de fallos inesperados y riesgos para el paciente	Integrar algoritmos de IA para predicción de fallos en el tubo de RX, sobrecalentamientos y patrones anómalos (Gil y Viega, 2018; Ley 1581 de 2012; Decreto 1377 de 2013). Usar modelos predictivos para optimizar dosis y reducir repetición de estudios. Implementar sistemas de alerta basados en machine learning (Najjar, 2023; Molina, 2024).

Nota. Elaboración propia

Las recomendaciones para fortalecer la integración de sistemas IoT en la radiología digital se orientan a adoptar estándares internacionales como HL7-FHIR, DICOMweb y MQTT que permitan mejorar la interoperabilidad entre sensores, PACS (Picture Archiving and Communication System), RIS (Radiology Information System) y plataformas dosimétricas. Se sugiere modernizar la infraestructura hospitalaria incorporando redes de alta capacidad, redundancia y soluciones de edge computing que posibiliten un monitoreo en tiempo real más estable.

Asimismo, es fundamental reforzar la ciberseguridad mediante cifrado, segmentación de red, autenticación multifactor y auditorías periódicas para evitar vulneraciones que comprometan la integridad de los equipos y los datos dosimétricos. A nivel técnico, se recomienda emplear sensores certificados, precisos y actualizables, estandarizando los protocolos de comunicación utilizados.

Es necesario implementar programas continuos de capacitación dirigidos al personal clínico, técnico y biomédico, junto con protocolos claros de respuesta ante alertas automatizadas. Finalmente, se propone incorporar algoritmos de IA para anticipar fallos, optimizar la trazabilidad de la dosis y elevar la protección radiológica del paciente dentro de un ecosistema IoT seguro y eficiente.

Tabla 3*Propuesta para fortalecer la integración IoT*

Mejora	Limitaciones	Recomendación
Interoperabilidad y Estándares	Dispositivos y plataformas que no comparten protocolos comunes	Implementar estándares abiertos como HL7-FHIR, DICOMweb, MQTT y APIs REST; exigir compatibilidad multivendor en licitaciones (Barreto y Sandoval, 2024; Cavli, 2025)
Infraestructura Tecnológica	Redes lentas, cortes intermitentes y dependencia total de la nube	Migrar a redes de alta capacidad (WiFi 6, fibra), incluir redundancia y adoptar edge computing para procesamiento local (Franco, 2024; Sánchez, 2019).
Ciberseguridad IoT	Riesgo de ataques, accesos no autorizados y manipulación de datos	Integrar cifrado extremo a extremo, segmentación de red, autenticación multifactor, firewalls específicos para IoT y auditorías periódicas (Alder, 2024; Chen et al., 2025; Caparros, 2023).
Calidad y Fiabilidad de Sensores IoT	Sensores de baja precisión o sin actualizaciones	Seleccionar sensores biomédicos certificados, con actualización OTA, mayor sensibilidad y protocolos de transmisión estandarizados (Sánchez, 2019; Casillo et al., 2024).
Gestión Operativa y Talento Humano	Poca capacitación en IoT, PACS, RIS y plataformas dosimétricas	Establecer programas de formación continua, simulación de alertas, protocolos de respuesta y comités internos de riesgo tecnológico (Mejía y Martín, 2023; Camargo et al., 2015).
Arquitectura IoT	Integración improvisada sin planificación técnica	Diseñar una arquitectura IoT híbrida (nube + edge), con dashboards unificados, microservicios y monitoreo centralizado (Franco, 2024; Barreto y Sandoval, 2024).
Gobernanza de Datos	Falta de políticas sobre manejo y trazabilidad dosimétrica	Crear políticas institucionales de gestión de datos IoT, estandarizar metadatos y realizar auditorías de calidad periódicas (Gil y Viega, 2018; Ley 1581 de 2012; Ministerio de Salud, 2019).
IA y Analítica Predictiva	Incapacidad para anticipar fallos o riesgos dosimétricos	Integrar IA para predicción de fallos en equipos, análisis automatizado de dosis y detección de patrones anómalos (Najjar, 2023; Molina, 2024; Trillo et al., 2024).

Nota. Elaboración propia

Tabla 4*Limitaciones en la integración del IoT en radiología digital*

Análisis	Resultados	Impacto	Autores
Captura y adquisición de datos IoT	Se identificó que los sensores IoT utilizados para medir variables críticas presentan variabilidad entre fabricantes, falta de calibración estandarizada y diferencias en precisión, lo que compromete la calidad inicial del dato.	Inexactitud en parámetros técnicos; afectación de la trazabilidad dosimétrica; datos no confiables; riesgo de decisiones clínicas imprecisas.	Sonavane et al. (2023); Casillo et al. (2024)
Procesamiento y análisis preliminar (Edge Computing)	Muchos dispositivos IoT no cuentan con capacidad de procesamiento local, obligando a depender de la nube, aumentando la latencia y reduciendo la detección temprana de fallos.	Retraso en alertas; menor capacidad predictiva; pérdida de funcionalidad en tiempo real; riesgo de fallos no detectados.	Franco (2024); Sivanagaraju y Kumar (2025)
Transmisión y comunicación entre sistemas	Incompatibilidad entre protocolos propietarios y estándares abiertos, pérdida de datos y vulnerabilidades en redes hospitalarias.	Asincronía de datos clínicos y dosimétricos; errores de trazabilidad; interrupciones operativas; exposición a ciberataques.	Alder (2024); Chen et al. (2025); Caparroso (2023)
Integración y almacenamiento en plataformas radiológicas (PACS/RIS)	Falta de estandarización en metadatos y dificultades de integración con DICOM, HL7 y sistemas IoT.	Brechas en seguridad radiológica; dificultad para aplicar NRD y ALARA; pérdida de información crítica para auditoría clínica.	Gil y Viega (2018); Ministerio de Salud (2019)
Generación de alertas y respuesta automática	Las alertas presentan retrasos o imprecisiones por latencia, baja calidad del dato y ausencia de modelos predictivos avanzados.	Reducción de respuesta inmediata; aumento del riesgo de error humano; fallos en protección radiológica.	Molina (2024); Najjar (2023);

Nota. Elaboración propia

Los resultados obtenidos evidencian que la integración del Internet de las Cosas (IoT) en radiología digital es un gran avance hacia la automatización, monitoreo en tiempo

real y mejora de la seguridad del paciente; sin embargo, su implementación enfrenta limitaciones estructurales, tecnológicas y organizacionales que afectan su efectividad clínica.

Las limitaciones en la captura de datos mediante sensores IoT reflejan problemas de estandarización y precisión metrológica. La literatura coincide en que la heterogeneidad entre fabricantes y la falta de calibración uniforme generan inconsistencias en los datos dosimétricos, lo cual compromete la trazabilidad clínica. La Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA, 2018) y Rehani (2017) enfatizan que la ausencia de estándares técnicos afecta directamente la calidad de la protección radiológica y el control de dosis en pacientes.

Asimismo, el procesamiento de datos en edge computing evidencia una dependencia excesiva de la nube, lo que incrementa la latencia y reduce la capacidad de respuesta en tiempo real. Según Barreto y Sandoval (2024) la falta de procesamiento local limita la detección temprana de fallas en equipos radiológicos, lo que impide generar alertas oportunas ante riesgos clínicos. Esto representa una brecha crítica en entornos donde la rapidez de respuesta es determinante para la seguridad del paciente.

Además, las dificultades en la transmisión y comunicación entre sistemas se deben a la interoperabilidad entre protocolos propietarios y estándares abiertos, así como a la infraestructura hospitalaria obsoleta. Camargo et al. (2015) y la Comisión Europea (2012) coinciden en que la falta de interoperabilidad es una de las principales barreras en la digitalización del sector salud, afectando la integración entre sistemas IoT (Internet of Things), PACS (Picture Archiving and Communication System), RIS (Radiology Information System) y HIS (Hospital Information System). Adicionalmente, los casos

recientes de ciberataques en el sector salud (Alder, 2024) evidencian que estas vulnerabilidades no solo son técnicas, sino también de seguridad operacional.

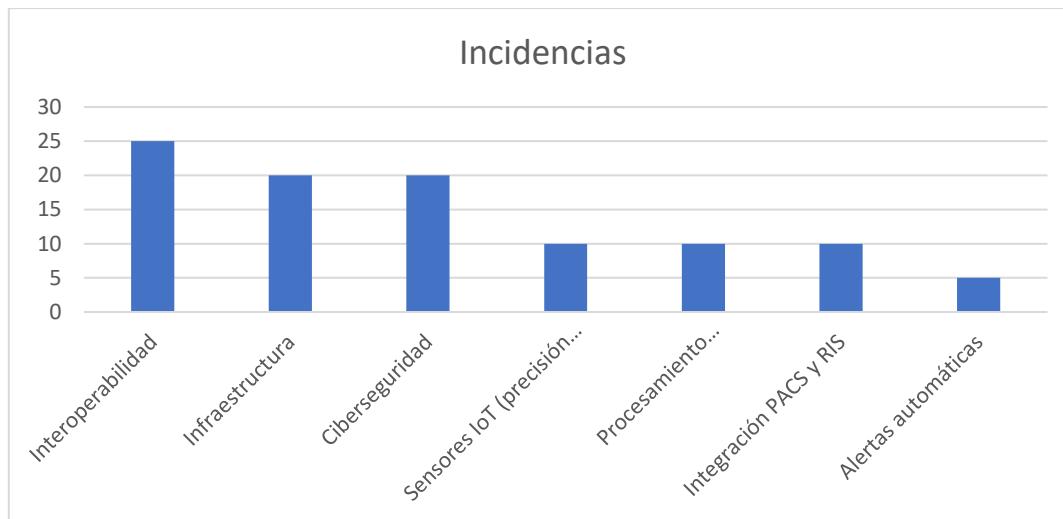
Igualmente, en la integración y almacenamiento de datos radiológicos, se identifica una debilidad en la gestión de metadatos y la falta de estandarización en la vinculación de información dosimétrica con estudios clínicos. Sodickson y Khorasani (2010) destacan que la ausencia de integración adecuada afecta la trazabilidad longitudinal del paciente y dificulta la aplicación del principio ALARA.

En cuanto a la generación de alertas automáticas, se evidencia que son tardías o ineficientes por fallos en la calidad del dato, la latencia de transmisión y la falta de modelos predictivos robustos. La ESR y EFRS (2019) señalan que la efectividad de los sistemas de alerta depende de la integridad de los datos y del procesamiento en tiempo real, mientras que Chen et al. (2025) destacan que las vulnerabilidades en ciberseguridad pueden alterar los sistemas de notificación y comprometer la protección del paciente.

El uso de IA en sistemas IoT radiológicos permite mejorar la predicción de fallas y la optimización del flujo de trabajo. Molina (2024) evidencia que los modelos de aprendizaje profundo pueden anticipar anomalías y ajustar parámetros de exposición en tiempo real, reduciendo riesgos asociados a la sobreexposición y mejorando la eficiencia operativa. Sin embargo, estos avances requieren un entorno regulatorio, técnico y formativo sólido. La evidencia indica que la falta de capacitación del personal, la ausencia de protocolos estandarizados y la infraestructura heterogénea continúan siendo barreras significativas para la implementación efectiva del IoT en radiología (Mejía y Martín, 2023).

Figura 5

Porcentaje de incidencias en la integración de IoT en radiología



Nota. Elaboración propia

La distribución de incidencias identificadas en la literatura relacionada con la integración de sistemas IoT (Internet of Things) en radiología digital, a partir de un proceso de categorización de hallazgos. Dichas incidencias fueron organizadas en términos porcentuales sobre el total de los hallazgos analizados, permitiendo identificar las principales barreras técnicas y operativas del sistema.

La Interoperabilidad refleja el 25%, es la incidencia más alta y predominante, evidenciando que la principal dificultad radica en la integración entre sistemas y dispositivos heterogéneos. Esta limitación se asocia a la ausencia de estándares unificados que permitan una comunicación eficiente entre plataformas clínicas, lo que afecta la consolidación de la información en entornos de salud digital (Alvear et al., 2017; Becerra, 2019).

La Infraestructura tiene el 20%, refleja limitaciones en la capacidad tecnológica, redes de comunicación y soporte físico necesario para la implementación de soluciones IoT

(Internet of Things). Diversos autores señalan que la efectividad de estos sistemas depende de una infraestructura robusta de conectividad y hardware especializado, cuya insuficiencia limita la escalabilidad y sostenibilidad de las soluciones tecnológicas en salud (Camargo et al., 2015; Franco, 2024).

La Ciberseguridad refleja el 20%, evidencia una preocupación significativa por la protección de datos clínicos y vulnerabilidad de los sistemas conectados. La literatura ha demostrado que la exposición de información médica y las fallas en sistemas como PACS (Picture Archiving and Communication System) incrementan los riesgos de seguridad digital (Davis, 2021), situación que se ha visto agravada por ataques recientes a instituciones de salud, lo que refuerza la necesidad de fortalecer los mecanismos de protección de la información (Caparroso, 2023; Alder, 2024).

Los Sensores IoT (Internet of Things) con el 10%, muestran problemas en la confiabilidad de la adquisición de datos biomédicos. Aunque estos dispositivos son fundamentales para el monitoreo clínico en tiempo real, aún presentan variaciones en la exactitud de las mediciones, lo que puede afectar la confiabilidad de la información generada (Alvear et al., 2017).

El Procesamiento de datos con el 10% evidencia dificultades en el manejo, análisis y almacenamiento de grandes volúmenes de información (Najjar, 2023; Trillo et al., 2024). La integración de inteligencia artificial ha mejorado este proceso, pero aún persisten limitaciones en la gestión eficiente de datos clínicos complejos (Molina, 2024; Hernández et al., 2014).

La Integración PACS (Picture Archiving and Communication System) y RIS (Radiology Information System) con el 10% representa retos en la sincronización de sistemas de archivo y comunicación radiológica. La interoperabilidad entre PACS (Picture

Archiving and Communication System) y sistemas clínicos sigue siendo un punto crítico debido a fallos en la integración de datos de imagen y registros electrónicos (Davis, 2021). Además, la automatización del reporte de dosis y la comunicación entre sistemas aún presenta barreras técnicas relevantes (Shih et al., 2011; Sodickson y Khorasani, 2010).

Las Alertas automáticas con el 5% es la incidencia menor, aunque sigue siendo relevante en la automatización del monitoreo clínico. Aunque los sistemas de alertas en IoT (Internet of Things) han mejorado la vigilancia en tiempo real, todavía existen limitaciones en su precisión y estandarización en entornos clínicos (Mejía y Martín, 2023). Sin embargo, se reconoce que estas herramientas son fundamentales para la detección temprana de eventos clínicos críticos (Barreto y Sandoval, 2024; Sivanagaraju y Kumar, 2025).

Los hallazgos evidencian que el IoT (Internet of Things) en radiología digital tiene un alto potencial para mejorar la seguridad del paciente; sin embargo, su efectividad está limitada por fallas estructurales persistentes en interoperabilidad, infraestructura, ciberseguridad y procesamiento de datos. Estas limitaciones no solo representan problemas técnicos, sino que constituyen riesgos clínicos críticos, ya que afectan directamente la calidad del diagnóstico, la trazabilidad dosimétrica y la oportunidad en la generación de alertas.

En conjunto, la literatura coincide en que la evolución del IoT (Internet of Things) en radiología depende de la transición hacia sistemas estandarizados, interoperables y con arquitectura distribuida segura, capaces de garantizar la confiabilidad del dato en tiempo real.

Tabla 5*Imprecisiones en la integración IoT en radiología*

Imprecisiones	Descripción	Autores
Interoperabilidad entre sistemas	Dificultad para integrar plataformas heterogéneas (IoT, PACS, RIS y sistemas clínicos), por la falta de estándares unificados.	Alvear et al. (2017); Becerra (2019); Sonavane et al. (2023)
Infraestructura tecnológica insuficiente	Limitaciones en redes, conectividad, hardware y soporte tecnológico para el funcionamiento continuo de sistemas IoT	Camargo et al. (2015); Franco (2024); Cavli (2025)
Vulnerabilidades en ciberseguridad	Exposición de datos clínicos, fallos en sistemas PACS y riesgo de ataques informáticos en entornos hospitalarios.	Davis (2021); Caparroso (2023); Alder (2024); Chen et al. (2025)
Imprecisión en sensores IoT	Variabilidad en la calidad y exactitud de los datos biomédicos capturados en tiempo real por dispositivos conectados.	Alvear et al. (2017); Sivanagaraju y Kumar (2025); Camargo et al. (2015)
Limitaciones en procesamiento de datos	Dificultad para gestionar grandes volúmenes de información generados en radiología-IoT, afectando análisis y almacenamiento.	Najjar (2023); Trillo et al. (2024); Molina (2024)
Fallas en integración PACS–RIS	Problemas de sincronización entre sistemas de archivo, comunicación y gestión de imágenes médicas.	Shih et al. (2011); Sodickson y Khorasani (2010); Davis (2021)
Estandarización limitada de alertas automáticas	Sistemas de alertas aún presentan baja precisión y falta de uniformidad en su implementación clínica.	Mejía y Martín (2023); Barreto y Sandoval (2024)

Nota. Elaboración propia

Conclusiones

La revisión realizada permite concluir que las limitaciones tecnológicas, operativas y de seguridad en la integración de sistemas IoT (Internet of Things) dentro de la radiología digital afectan de manera directa la calidad del monitoreo clínico, la detección temprana de fallos y la generación automatizada de alertas.

La falta de interoperabilidad, la conectividad inestable, la ausencia de estandarización y las deficiencias en la infraestructura hospitalaria reducen la capacidad de los sistemas para transmitir datos de forma continua y confiable, comprometiendo la precisión diagnóstica y la toma de decisiones clínicas. Estas restricciones se agravan con las vulnerabilidades de ciberseguridad, que ponen en riesgo la integridad de la información dosimétrica y la seguridad del paciente, así como con la falta de modelos predictivos y de procesamiento en borde, indispensables para disminuir la latencia en escenarios donde el tiempo de respuesta es crítico.

Las limitaciones en la integración IoT (Internet of Things) en radiología digital, especialmente la falta de interoperabilidad, la latencia generada por arquitecturas dependientes de la nube, las vulnerabilidades de ciberseguridad y la ausencia de estandarización en sensores y protocolos, afectan directamente el monitoreo en tiempo real, retrasan la generación de alertas críticas y comprometen la protección del paciente.

Estas limitaciones conforman una cadena de fallos acumulativos que inicia en la captura de datos mediante sensores no estandarizados y termina en la imposibilidad de generar alertas oportunas ante riesgos operativos. Frente a este panorama, se evidencia la necesidad de implementar estrategias integrales que incluyan la estandarización de protocolos de comunicación, el fortalecimiento de la infraestructura tecnológica y de las redes hospitalarias, el desarrollo de mecanismos sólidos de ciberseguridad, la incorporación

de soluciones de IA y edge computing, y la capacitación continua del personal. La adopción de estas medidas permitirá consolidar entornos radiológicos digitales más seguros, confiables y eficientes, orientados a garantizar la protección radiológica y el bienestar del paciente.

Superar estas barreras técnicas requiere una arquitectura IoT estandarizada, mecanismos de ciberseguridad robustos y estrategias híbridas de procesamiento (edge + cloud) que reduzcan la latencia y fortalezcan la trazabilidad clínica, con la adopción de modelos interoperables, redes segmentadas, sensores certificados y sistemas PACS (Picture Archiving and Communication System) y RIS (Radiology Information System) integrados permitiría mejorar la confiabilidad de las alertas, garantizar la continuidad del monitoreo y aumentar la seguridad del paciente. Con ello, la radiología puede evolucionar de un enfoque reactivo de gestión del riesgo a un modelo verdaderamente proactivo, automatizado y predictivo.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Internacional de Energía Atómica. (2018). *Protección y seguridad radiológica en los usos médicos de la radiación ionizante (SSG-46)*. AIEA.
<https://www.sepr.es/profesionales/otras-publicaciones/1154-oiea-guia-de-seguridad-especifica-no-ss-46-proteccion-y-seguridad-radiologicas-en-los-usos-medicos-de-la-radiacion-ionizante>
- Alder, S. (2024). Change Healthcare Responding to Cyberattack. *HIPAA Journal*.
<https://www.hipaajournal.com/change-healthcare-responding-to-cyberattack/>
- Alfonso, A. (2021). *Dosis efectiva en pacientes adultos en tomografía computarizada*. [Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio institucional.
<https://repository.javeriana.edu.co/items/e85baea4-c0cd-49fc-a424-62c061660430>
- Allende, F., Lobos, V., & Zúñiga, A. (2016). Corrección de índice de dosis en tomografía computarizada por parámetro de diámetro efectivo según reporte 204 de la Asociación Americana de Físicos Médicos. *Revista Chilena de Radiología*, 22(2), 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.rchira.2016.06.002>
- Alvear, V., Rosero, P., & Peluffo, D. (2017). *Internet de las cosas y visión artificial, funcionamiento y aplicaciones: Revisión de literatura*. *Enfoque UTE*, 8(1).
<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n1.121>
- Amaya, E., & Muñoz, E. (2021). Determinación de niveles de referencia de dosis (DRL) en procedimientos diagnósticos. *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*.
<https://revistas.sgc.gov.co/index.php/invapnuclear/article/view/604>
- American Association of Physicists in Medicine. (2011). *Size-specific dose estimates (SSDE) in pediatric and adult body CT examinations (AAPM Report No. 204)*.
https://www.aapm.org/pubs/reports/rpt_204.pdf

- American Association of Physicists in Medicine. (2014). *Use of water equivalent diameter for calculating patient size and size-specific dose estimates (SSDE) in CT* (AAPM Report No. 220). https://www.aapm.org/pubs/reports/rpt_220.pdf
- Arias, C. (2006). La regulación de la protección radiológica y la función de las autoridades de salud. Contexto legal y normativo de protección radiológica. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 20(2-3), 188–197.
<https://www.scielosp.org/pdf/rpsp/2006.v20n2-3/188-197/es>
- Barreto, S., & Sandoval J. (2024). *Vigilancia tecnológica del internet de las cosas (IoT) aplicado en el sector salud*. [Proyecto de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería]. Repositorio institucional.
<https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/e6cb27af-a6eb-40d3-8ee2-f3a2cec35da8/content>
- Becerra, L. (2019). Internet de las cosas para el cuidado de la salud. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 13(26).
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672019000200007
- Camargo, J., Gaona, E., & Morales, O. (2015). Sistema de monitoreo para pacientes de alto riesgo integrando módulos GPS, GSM/GPRS y Zigbee. *Tecnura*, 19(47), 87–101.
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/7995>
- Caparros, J. (2023). Ataques a EPM y Sanitas encienden las alarmas sobre la ciberseguridad en Colombia. *Forbes Colombia*.
<https://forbes.co/2023/01/25/tecnologia/ataques-a-epm-y-sanitas-encienden-las-alarmas-sobre-la-ciberseguridad-en-colombia>

- Casillo, M., Cecere, L., Colace, F., Lorusso, A., & Santaniello, D. (2024). Integrating the Internet of Things (IoT) in SPA medicine: Innovations and challenges in digital wellness. *Computers*, 13(3), 67. <https://doi.org/10.3390/computers13030067>
- Cavli, W. (2025). IoT in Healthcare: Transforming Patient Care with Connected Medical Devices. <https://www.cavliwireless.com/blog/nerdiest-of-things/iot-in-healthcare>
- Chen, P., Desjardins, B., Strassner, B., Forghani, R., Bodak, R., GIchoya, J., Whitfill, J., Ehamn, E.R., & Wald, C. (2025). Protección de datos y dispositivos radiológicos contra amenazas de ciberseguridad: Informe conjunto del ACR y SIIM. *PubMed*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40760261/>
- Comisión Europea. (2012). *Plan de acción de salud electrónica 2012-2020: Atención sanitaria innovadora para el siglo XXI*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2013:280:0033:0037:ES:PDF>
- Congreso de la República de Colombia. (2012). *Ley 1581 de 2012*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=49981>
- Davis, J. (2021). Millions of medical images, patient data remain exposed via PACS flaws. *SC Media*. <https://www.scworld.com/news/millions-of-medical-images-patient-data-remain-exposed-via-pacs-flaws>
- Emergen Research (2024). *El internet de las cosas médicas: mejorando la atención médica con IoT*. <https://www.emergenresearch.com/es/blog/el-internet-de-las-cosas-m%C3%A9dicas-mejora-la-atenci%C3%B3n-sanitaria-con-iot>
- European Society of Radiology (ESR), & European Federation of Radiographer Societies (EFRS). (2019). Patient safety in medical imaging. *Radiography*, 25(2), e(26)-e38. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2019.01.009>

- Estévez, R. (2018). *Dosimetría Radiológica. Bases para comprender medición de dosis y control radiológico en salud, incluyendo CTDIvol, DLP y SSDE*. [Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador].
<https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/0ddac459-675a-40e0-8a5c-4bcc2ad542c5/content>
- Fernández, L., García, E., & Riestra, S. (2020). Las responsabilidades derivadas del uso de las tecnologías de la información y comunicación en el ejercicio de las profesiones sanitarias. *Anales de Pediatría*, 92(3), 190–198.
<https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2020.03.003>
- Franco, D. (2024). *Implementación de un sistema IoT para la gestión y monitoreo de activos no estacionarios* [Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería de Antioquia].
<https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/790f039a-9dd3-4803-8a72-cf3800afc67e/content>
- Fundación de Altos Estudios Básicos en Ciencias Aplicadas. (2025). *Inteligencia artificial en tomografía computarizada* [Informe técnico]. <https://www.faba.edu.co/wp-content/uploads/2025/08/INTELIGENCIA-ARTIFICIAL-EN-TOMOGRAFIA-COMPUTARIZADA.pdf>
- García, I. (s.f.). Investigación exploratoria, descriptiva, explicativa y correlacional.
http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/108148/secme-1623_1.pdf
- Gil, J., & Viega, M. (2018). Historia clínica electrónica: confidencialidad y privacidad de los datos clínicos. *Revista Médica Universitaria*, 34(4).
<https://doi.org/10.29193/rmu.34.4.6>
- Gómez, S. (2025). The future of digital Radiology: transformimgimaging and improvin. *Revista Electrónica de PortalesMedicos.com, Volumen X*. <https://www.revista->

portalesmedicos.com/revista-medica/el-futuro-de-la-radiologia-digital-transformacion-en-la-imagenologia-y-mejora-de-la-precision-diagnostica/

González, A. (1994). Seguridad radiológica: Nuevas normas internacionales. [Informe técnico]. *Agencia Internacional de Energía Atómica*.

https://www.iaea.org/sites/default/files/36202040211_es.pdf

González, A. (2016). *Normas básicas internacionales de seguridad en protección radiológica*. Fuente normativa oficial para proteger a personas y entornos de efectos nocivos de radiación ionizante [Informe técnico]. *Agencia Internacional de Energía Atómica*.

<https://www.iaea.org/es/publications/10812/proteccion-radiologica-y-seguridad-de-las-fuentes-de-radiacion-normas-basicas-internacionales-de-seguridad>

Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, P. (2014). Metodología de la Investigación.

Edición 6. McGraw Hill. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008>

Higuera, D. (2023). *Análisis del uso y eficacia de la Inteligencia Artificial en Tomografía Computarizada*. [Trabajo de Grado, Fundación de Educación Superior San José].

Repositorio Institucional FABA. <https://www.faba.edu.co/wp-content/uploads/2025/08/INTELIGENCIA-ARTIFICIAL-EN-TOMOGRAFIA-COMPUTARIZADA.pdf>

Martínez, Á., & González, M. (2024). Inteligencia artificial en pediatría: Actualidad y retos. *Anales de Pediatría*, 200(4). <https://pdf.sciencedirectassets.com/277688/1-s2.0-S1695403324X00028/1-s2.0-S1695403324000377/main.pdf>

Mejía, I., & Martín, D. (2023). *Eficiencia y seguridad en sistemas de monitoreo y diagnóstico remoto para pacientes con enfermedades crónicas*. Repositorio UNAD

<https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/3801>

- Ministerio de Salud y Protección Social. (2019). *Resolución 3100 de 2019. Por la cual se definen los procedimientos y condiciones de habilitación de los servicios de salud.*
https://www.minsalud.gov.co/normatividad_nuevo/resoluci%C3%B3n%20no.%203100%20de%202019.pdf
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2025). *Resolución 1811 de 2025. Por la cual se reglamenta el uso de equipos generadores de radiación ionizante y la prestación de servicios de protección radiológica.*
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-1811-de-2025.pdf>
- Molina, C. (2024). *Automatización y deep learning en radiología: Aplicaciones en estimación de dosis en TC pediátrica y adultos.* [Ponencia, Congreso Internacional de Radiología].
- Najjar, R. (2023). Redefining radiology: A review of artificial intelligence integration in medical imaging. *Diagnostics*, 13(17), 2760.
<https://doi.org/10.3390/diagnostics13172760>
- Ortiz, M. (2017). *Sistema de vigilancia radiológica para las unidades de cirugía de instituciones de salud.*
<https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/67ee213c-81fe-4ea4-bd1d-b3bd491c51ec/content>
- Presidencia de la República de Colombia. (2013). *Decreto 1377 de 2013. Por el cual se reglamenta parcialmente la Ley 1581 de 2012.*
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=53646>
- Rehani, M. (2017). Patient radiation exposure and dose tracking: a perspective. *Journal of Medical Imaging*, 4(3), 031206. <https://doi.org/10.1117/1.JMI.4.3.031206>

Resolución 482 de 2018. (s.f.). *Ministerio de Salud y Protección Social, 0000482 de 2018.*

https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%20No.%20482%20de%202018.pdf

Rodríguez, A., Martínez, L., & Reyes, S. (2023). *Uso de nuevas tecnologías en Radiología e imágenes diagnósticas.* https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4929

Sánchez, L. (2019). *Internet de las cosas para el cuidado de la salud. Entre Ciencia e Ingeniería, 7-8.* <https://doi.org/10.31908/19098367.1167>

Shih, G., Lu, Z., Zabih, R., Kennedy, D., Loftus, M., Shih, W., Osborne, J., Nickoloff, E., & Schwartz, L. (2011). Automated framework for digital radiation dose index reporting from CT dose reports. *American Journal of Roentgenology, 197*, 1455–1462. <https://doi.org/10.2214/AJR.11.6650>

Sivanagaraju, V., & Kumar, D. (2025). Hybrid deep learning for IoT-based health monitoring with physiological event extraction. *Digital Health, 11*, 20552076251337848. <https://doi.org/10.1177/20552076251337848>

Sodickson, A., & Khorasani, R. (2010). Patient-centered radiation dose monitoring in the electronic medical record: What are some of the barriers and key next steps? *Journal of the American College of Radiology, 7*(10), 788–79 <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2010.06.022>

Sonavane, A., Khamparia, A., & Gupta, D. (2023, 16 de julio). Una revisión sistemática sobre Internet de las cosas médicas: técnicas, problemas abiertos y direcciones futuras. *Salud by Díaz.* <https://saludbydiaz.com/2023/07/16/una-revision-sistemica-sobre-internet-de-las-cosas-medicas-tecnicas-problemas-abiertos-y-direcciones-futuras/>

Trillo, T., Escobar, M., Pérez, M., Peña, B., Suárez, B., & Rodríguez, F. (2024). La inteligencia artificial como herramienta en radiología. Aplicaciones tecnológicas actuales que inciden en procesos radiológicos y su seguridad. *Revista Piper SERAM*. <https://www.piper.espacio-seram.com/index.php/seram/article/view/10989/9455>

Universidad de la Sabana. (2026). *Internet of medical things: ¿Cómo los dispositivos y las aplicaciones están cambiando la medicina?* [Artículo institucional]. <https://www.unisabana.edu.co/noticias/al-dia/internet-medical-things-como-los-dispositivos-y-las-aplicaciones-estan-cambiando-la-medicina>