

**Avances en la estimación personalizada de dosis en tomografía computarizada: una
revisión de modelos computacionales y aprendizaje automático**

Michel Dayana Useche Chacón

Natalia Giraldo Agudelo

Jhon Anderson Llanos Quintero

Jorgetis Márquez Montalvo

Juan David Andrade Arnago

Asesor

Alberto Guzmán Avilés

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias de la Salud - ECISA

Tecnología en Radiología e Imágenes Diagnósticas

2025

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a la directora, Edna Rocío Jamaica y a nuestro asesor, Alberto Guzmán Avilés, por su guía, apoyo constante y recomendaciones durante el desarrollo de esta investigación.

Agradecemos a Dios por darnos fortaleza, resiliencia y perseverancia para culminar este proyecto.

Expresamos agradecimiento y reconocimiento a nuestras familias, por su comprensión, paciencia, apoyo y motivación incondicional.

De igual manera, agradecemos a la UNAD por brindarnos el espacio necesario para la realización de esta investigación, para nuestro crecimiento personal y profesional.

Finalmente, agradecemos a nosotros mismos: Jhon Anderson Llanos Quintero, Jorgetis Márquez Montalvo, Juan David Andrade Arnago, Michel Dayana Useche Chacón y Natalia Giraldo Agudelo, por el compromiso, el trabajo en equipo y la dedicación para la culminación de este proyecto.

Resumen

La tomografía computarizada (TC) es una herramienta esencial en el diagnóstico médico; sin embargo, el uso de radiaciones ionizantes exige optimizar la dosis para garantizar la seguridad del paciente sin afectar la calidad diagnóstica. La dosimetría basada en métricas genéricas ha impulsado el desarrollo de estimaciones personalizadas de dosis mediante modelos computacionales y técnicas de aprendizaje automático. Este trabajo aborda la protección radiológica en TC mediante revisión sistemática sobre el desarrollo, validación y aplicación de modelos computacionales para la estimación personalizada de dosis. El marco teórico se basa en modelos anatómicos, simulaciones Monte Carlo y algoritmos de aprendizaje automático capaces de predecir métricas dosimétricas como CTDIvol, DLP y dosis en órganos, incorporando características específicas del paciente. Estos enfoques permiten superar las estimaciones convencionales y optimizar los parámetros de adquisición. La metodología incluyó el análisis de los modelos dosimétricos y sus técnicas de validación, mediante la comparación con mediciones físicas y clínicas y la evaluación de la precisión mediante métricas de error. Los resultados reportados en la literatura evidencian la viabilidad de estos modelos para dar estimaciones de dosis más precisas, contribuyendo a la reducción de la exposición radiológica y a mejorar la calidad de imagen. No obstante, persisten limitaciones, como la dependencia de la calidad de los datos de entrada, la necesidad de validación prospectiva y los desafíos asociados a su implementación clínica. En conclusión, esta revisión destaca el potencial de las herramientas computacionales y del aprendizaje automático para optimizar los protocolos de TC y mejorar la seguridad del paciente con una dosificación personalizada.

Palabras clave: Tomografía computarizada, dosis, aplicaciones Monte Carlo, calidad de la imagen, medidas

Abstract

Computed tomography (CT) is an essential tool in medical diagnosis; however, the use of ionizing radiation requires dose optimization to ensure patient safety without compromising diagnostic image quality. Dosimetry based on generic metrics has driven the development of personalized dose estimation using computational models and machine learning techniques. This work addresses radiation protection in CT through a systematic review of the development, validation, and application of computational models for personalized dose estimation. The theoretical framework is based on anatomical models, Monte Carlo simulations, and machine learning algorithms capable of predicting dosimetric metrics such as CTDI_{vol}, DLP, and organ doses, incorporating patient-specific characteristics. These approaches enable improvements over conventional dose estimates and support optimization of acquisition parameters. The methodology included analysis of dosimetric models and their validation techniques, through comparison with physical and clinical measurements and accuracy assessment using error metrics. The results reported in the literature demonstrate the feasibility of these models to provide more accurate dose estimates, contributing to reduced radiation exposure and improved image quality. Nevertheless, limitations remain, including dependence on input data quality, the need for prospective validation, and challenges related to clinical implementation. In conclusion, this review highlights the potential of computational tools and machine learning to optimize CT protocols and enhance patient safety through personalized dosimetry.

Keywords: Computed tomography, dose, Monte Carlo applications, image quality, measures

Tabla de Contenido

Introducción	8
Planteamiento del Problema	10
Justificación	13
Objetivos.....	16
Objetivo General	16
Objetivos Específicos.....	16
Marco Teórico.....	17
Generalidades de la Tomografía Computarizada	18
<i>Definición</i>	18
<i>Funcionamiento</i>	18
<i>Principio Físico</i>	18
Generalidades de la Protección Radiológica.....	19
Interacción de la Radiación con la Materia.....	19
Dosis en Tomografía Computarizada.....	20
Definición de CTDI, DLP y sus Limitaciones	20
Estimación de Dosis y Proceso de Medición	21
Métricas Asociadas a la Dosis en TAC	22
Métodos Tradicionales para Estimación de Dosis	22
Modelos Computacionales para Estimación de Dosis	22
<i>Simulación Monte Carlo</i>	23
<i>Aprendizaje Automático</i>	23
Diferencias entre Métodos Tradicionales y Computacionales	24

Protocolos y Normativa para Estimación de Dosis y Optimización	24
Marco Metodológico.....	25
Fases del Proyecto.....	25
<i>Búsqueda en Bases de Datos</i>	25
<i>Selección de Fuentes</i>	26
<i>Criterios de Inclusión</i>	26
<i>Criterios de Exclusión</i>	26
<i>Organización Temática</i>	27
<i>Análisis e Interpretación</i>	27
<i>Síntesis y Conclusiones</i>	27
<i>Matriz de Referencias</i>	27
Resultados.....	30
Análisis Comparativo.....	30
Impacto de la Anatomía del Paciente en la Estimación de Dosis	31
Monte Carlo vs Aprendizaje Automático.....	31
Implicaciones Clínicas y Principio ALARA.....	32
Propuesta de Hoja de Ruta Clínico-Tecnológica	32
Conclusiones.....	33
Referencias Bibliográficas.....	35

Lista de tablas

Tabla 1 *Matriz de Referencias* 28

Tabla 2 *Comparación de Precisión de Estudios Seleccionados* 31

Introducción

La tomografía computarizada (TC) ha revolucionado el diagnóstico médico al ofrecer un sistema preciso y equitativo para obtener imágenes detalladas de las estructuras internas del cuerpo humano. Sin embargo, la interpretación de estas imágenes requiere un análisis cuidadoso, en respeto a la verdad clínica. El uso de radiaciones ionizantes en los procedimientos de TC presenta un desafío fundamental: equilibrar la necesidad de obtener diagnósticos precisos con la minimización de la dosis de radiación administrada a los pacientes, con el fin de reducir posibles riesgos asociados a la exposición (OMS, 2022). Este equilibrio se ha convertido en uno de los mayores retos en la práctica radiológica, impulsando la búsqueda de estrategias innovadoras para optimizar la dosis sin comprometer la calidad de la imagen.

En este contexto, los modelos computacionales emergen como herramientas prometedoras para abordar esta problemática. Estos modelos permiten manipular y ajustar la dosis de radiación, además de optimizar los parámetros de adquisición mediante simulaciones que replican la interacción entre la radiación y los tejidos del paciente (García-Rodríguez et al., 2023). La personalización de la dosis, basada en las características individuales del paciente, posibilita obtener imágenes de calidad suficiente con una exposición radiológica reducida, promoviendo así una práctica más segura y efectiva.

No obstante, la implementación de estos modelos en la práctica clínica presenta tanto oportunidades como desafíos. Entre las ventajas destacan la disminución de la exposición a radiaciones, la mejora en la calidad de las imágenes y la optimización de recursos radiológicos. Sin embargo, también existen limitaciones técnicas, organizativas y clínicas que dificultan su adopción, como la necesidad de validar los modelos, la inversión en tecnología avanzada y la capacitación del personal sanitario.

El presente documento tiene como objetivo realizar una revisión sistemática de la literatura científica sobre el uso de modelos anatómicos computacionales en la dosificación personalizada en TC. Se busca destacar el potencial de estas tecnologías para reducir la dosis de radiación, mejorar la calidad de las imágenes y optimizar los recursos radiológicos, promoviendo una práctica más segura y adaptada a las necesidades de cada paciente. Además, se analizarán las dificultades y barreras existentes, ofreciendo un panorama actualizado de los avances en este campo y sugiriendo líneas de investigación futuras que contribuyan a consolidar estos enfoques en la rutina clínica.

Planteamiento del Problema

La tomografía computarizada (TC) representa uno de los avances más significativos en el diagnóstico médico desde su introducción en la práctica clínica en 1972, cuando permitió obtener imágenes transversales del cuerpo humano con una precisión sin precedentes. El origen de esta tecnología se remonta a finales de la década de 1960, con el desarrollo teórico por parte de Godfrey Hounsfield y Allan Cormack, quienes recibieron el Premio Nobel de Medicina en 1979 por su contribución. El primer equipo de TC especializado en imágenes craneales se instaló en Estados Unidos en 1971, y el primer escáner comercial, el EMI Mark I, fue introducido en 1973, aunque con una resolución espacial limitada en comparación con los estándares actuales. A lo largo de su historia, la TC ha evolucionado rápidamente, incorporando avances como la tomografía helicoidal en la década de 1990 y la tomografía multicorte (TCMC) en los años 2000, lo que ha permitido adquisiciones más rápidas y detalladas, pero también ha incrementado su uso exponencial en todo el mundo (McCollough et al., 2020).

Este crecimiento ha dado origen a preocupaciones sobre la exposición a radiación ionizante, ya que la TC se asocia con dosis significativas que pueden contribuir a riesgos estocásticos como el cáncer inducido por radiación. Históricamente, los estudios sobre estimación de dosis en TC surgieron poco después de su adopción clínica, impulsados por la necesidad de equilibrar el beneficio diagnóstico con la minimización de riesgos. En los años 1980 y 1990, se desarrollaron métricas estándar como el Índice de Dosis en Tomografía Computada (CTDI), definido como una integral de la dosis a lo largo del eje z para cuantificar la exposición en fantomas estandarizados, utilizando métodos como simulaciones Monte Carlo para modelar la interacción de la radiación con los tejidos (Andisco et al., 2014).

Estos enfoques iniciales se basaban en aproximaciones generales, recurriendo a modelos simplificados de la anatomía humana y mediciones externas, ya que es imposible medir directamente la dosis efectiva en órganos individuales de un paciente. El método Monte Carlo, en particular, ha experimentado un desarrollo notable en las últimas décadas, permitiendo simulaciones múltiples para calcular coeficientes dosimétricos y relaciones entre dosis externas e internas (Andisco et al., 2014).

Sin embargo, a pesar de estos avances, las estimaciones tradicionales de dosis, como el CTDI ponderado (CTDI_w) o el producto dosis-longitud (DLP), se basan en fantomas antropomórficos estandarizados que no capturan la variabilidad anatómica individual, como el tamaño corporal, la composición tisular o las características específicas del protocolo de adquisición. Esto genera incertidumbre en la evaluación de riesgos, pudiendo llevar a subestimaciones o sobreestimaciones que afectan la seguridad del paciente y la optimización de protocolos (Papadakis et al., 2025).

El incremento en el número de estudios de TC, que en países desarrollados representa más del 10% de los procedimientos radiológicos diagnósticos y ha aumentado hasta ocho veces en las últimas dos o tres décadas, ha intensificado la necesidad de transitar hacia estimaciones personalizadas (Andisco et al., 2014).

El presente proyecto busca abordar esta problemática mediante una revisión de la literatura enfocada en modelos que describen la interacción de la radiación utilizando datos reales de pacientes, analizando su precisión a partir de la correlación con mediciones físicas y clínicas reportadas en estudios previos.

De aquí surge la pregunta de investigación central: ¿Cómo desarrollar y validar modelos computacionales que permitan una estimación precisa y personalizada de la dosis en estudios de

TC, integrando técnicas como simulaciones Monte Carlo y aprendizaje automático, para optimizar la protección radiológica sin comprometer la calidad diagnóstica?

Esta interrogante emerge de la brecha entre las métricas generales actuales y la demanda clínica por enfoques individualizados, especialmente en poblaciones vulnerables como niños o pacientes con anatomías atípicas, donde la validación contra mediciones dosimétricas tradicionales en fantomas es esencial para garantizar confiabilidad y aceptación en la práctica (Andisco et al., 2014).

Justificación

La presente investigación se justifica por el crecimiento sostenido del uso de la tomografía computarizada (TC) como herramienta diagnóstica en las últimas décadas, particularmente en países desarrollados, donde su utilización se ha incrementado de manera significativa y representa una proporción relevante de los procedimientos radiológicos. Este aumento ha generado preocupación por las dosis de radiación ionizante recibidas por los pacientes, especialmente en poblaciones vulnerables como la pediátrica, que se someten a un elevado número de estudios anuales, lo que incrementa el riesgo de efectos estocásticos asociados a la exposición acumulada (Andisco et al., 2014; Carvajalino et al., 2024).

En este contexto, la literatura científica ha evidenciado la necesidad de superar las estimaciones dosimétricas genéricas basadas en fantomas estandarizados, promoviendo enfoques de estimación personalizada de dosis. Diversos estudios han explorado el uso de modelos computacionales, simulaciones Monte Carlo y técnicas de aprendizaje automático para estimar métricas dosimétricas como CTDI_{vol}, DLP y dosis en órganos, considerando variables individuales del paciente, como talla, peso y anatomía (Díez, 2001; Carvajalino et al., 2024).

La creciente necesidad de optimizar la dosimetría en tomografía computarizada (TC) responde tanto a preocupaciones por la seguridad del paciente como a la demanda de prácticas radiológicas más precisas y personalizadas. Kalogeropoulos y Koutsouveli (2024) destacan que los avances en métodos computacionales representan una vía prometedora para ajustar parámetros de adquisición y mejorar la eficiencia de los protocolos de TC, reduciendo la exposición a radiación sin comprometer la calidad de imagen.

Asimismo, Lawson et al., (2022) evidencian la variabilidad entre diferentes métodos de estimación de dosis basados en simulaciones Monte Carlo y mediciones directas con fantomas,

especialmente en poblaciones sensibles como los pacientes pediátricos. Su estudio subraya la necesidad de métodos más robustos y validados que permitan estimar de manera confiable la dosis de órganos y la dosis efectiva, aportando una base empírica para la comparación entre enfoques computacionales y mediciones físicas. Esta comparación es esencial para comprender las limitaciones de las prácticas tradicionales y justificar la adopción de modelos que integren información anatómica específica del paciente.

Por otro lado, Lee y Lee (2023) proponen un marco para la predicción de dosimetría personalizada en pacientes pediátricos mediante la integración de técnicas de aprendizaje automático con simulaciones Monte Carlo, lo que evidencia el potencial de enfoques híbridos. Su trabajo enfatiza que los métodos tradicionales, basados en plantillas y parámetros genéricos, no capturan adecuadamente las variaciones anatómicas individuales, particularmente en poblaciones vulnerables, como los niños, donde la precisión de la dosimetría tiene implicaciones clínicas críticas.

En conjunto, estas investigaciones sustentan la pertinencia de una revisión sistemática centrada en modelos computacionales para la estimación personalizada de dosis en TC, ya que permiten identificar avances, limitaciones metodológicas y brechas de conocimiento que deben abordarse para lograr una práctica clínica más segura, eficiente y ajustada a las características individuales del paciente (Kalogeropoulos y Koutsouveli, 2024; Lawson et al., 2022; Lee y Lee, 2023).

Esta revisión documental se orienta a analizar críticamente los avances, metodologías y resultados reportados en la literatura sobre dichos modelos, así como sus estrategias de validación frente a mediciones dosimétricas físicas y clínicas. Asimismo, se examina su

contribución a la optimización de protocolos de TC, en concordancia con principios de protección radiológica como ALARA, y su impacto en la calidad de imagen.

El estudio resulta relevante al sintetizar el conocimiento existente y evidenciar brechas, limitaciones y oportunidades de investigación futura, contribuyendo a la toma de decisiones informadas en radiología y al fortalecimiento de prácticas más seguras y basadas en evidencia, en un contexto de creciente utilización de la TC a nivel global.

Objetivos

Objetivo General

Analizar la evidencia científica reciente sobre el uso de modelos computacionales para la estimación personalizada de dosis en Tomografía Computarizada, determinando su precisión técnica y su aplicabilidad en la optimización de la protección radiológica.

Objetivos Específicos

Sintetizar el estado del arte de los modelos computacionales, incluyendo técnicas de simulación Monte Carlo y algoritmos de aprendizaje automático, aplicados a la estimación de dosis en tomografía computarizada, identificando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones clínicas reportadas.

Contrastar los niveles de precisión reportados entre las estimaciones de dosis obtenidas mediante modelos computacionales y las métricas dosimétricas tradicionales, como CTDIvol, DLP y dosis en órganos, a partir de los indicadores cuantitativos descritos en la literatura.

Categorizar los factores anatómicos del paciente y los parámetros técnicos de adquisición que influyen en la variabilidad y precisión de la dosis personalizada según los estudios revisados.

Identificar los principales desafíos, limitaciones y barreras actuales para la implementación clínica de los modelos computacionales de estimación personalizada de dosis en los servicios de radiodiagnóstico.

Marco Teórico

La tomografía computarizada (TC) se ha consolidado como una de las principales herramientas de diagnóstico por imágenes en la práctica clínica moderna, debido a su alta capacidad para proporcionar información anatómica detallada de manera rápida y no invasiva. No obstante, su uso implica la exposición del paciente a radiación ionizante, lo que ha generado un creciente interés por optimizar los procedimientos diagnósticos y mejorar las estrategias de protección radiológica, especialmente en poblaciones vulnerables y en pacientes sometidos a estudios repetidos (Lawson et al., 2022).

En este contexto, la estimación precisa de la dosis de radiación en TC adquiere un papel fundamental para garantizar un equilibrio adecuado entre calidad diagnóstica y seguridad del paciente. Tradicionalmente, la dosimetría en TC se ha basado en métricas estandarizadas, como el CTDI y el DLP, derivadas de mediciones en fantomas representativos de un paciente promedio. Sin embargo, estas aproximaciones presentan limitaciones al no considerar la variabilidad anatómica y fisiológica real de los pacientes, lo que puede conducir a estimaciones inexactas de la dosis absorbida en órganos específicos (Carvajalino et al., 2024)

Frente a estas limitaciones, en las últimas décadas se ha evidenciado un avance significativo en el desarrollo de modelos computacionales para la estimación personalizada de dosis, apoyados en simulaciones Monte Carlo y, más recientemente, en técnicas de aprendizaje automático. Estos enfoques permiten integrar información anatómica individual y parámetros técnicos de adquisición, ofreciendo estimaciones más realistas y detalladas de la distribución de dosis en el paciente. La literatura científica reciente resalta el potencial de estas herramientas para optimizar protocolos clínicos, fortalecer el principio ALARA y contribuir a una práctica radiológica más segura y basada en evidencia.

Con el fin de comprender la problemática del estudio, el marco teórico se organiza en los siguientes ejes temáticos:

Generalidades de la Tomografía Computarizada

Definición

La tomografía computarizada (TC), también conocida como tomografía axial computarizada (TAC), es una técnica de imagenología diagnóstica que utiliza rayos X para generar imágenes transversales detalladas del interior del cuerpo humano. Su definición radica en la capacidad de producir secciones o "cortes" bidimensionales que pueden reconstruirse en tres dimensiones, permitiendo una visualización precisa de estructuras anatómicas sin superposiciones (Akhavanallaf et al., 2020).

Funcionamiento

El funcionamiento de la TC se basa en un tubo de rayos X que gira alrededor del paciente mientras este se desplaza a través de un Gantry, capturando proyecciones múltiples desde diferentes ángulos. Estas proyecciones se procesan mediante algoritmos de reconstrucción, como la retroproyección filtrada, para formar las imágenes finales (Andisco et al., 2014).

Principio Físico

La TC se basa en la atenuación diferencial de los rayos X por los tejidos: los tejidos densos, como el hueso, atenúan más la radiación que los tejidos blandos, generando contrastes medidos en unidades Hounsfield (UH), donde el agua = 0 UH y el aire = -1000 UH. Con la evolución hacia TC multicorte y helicoidal, su uso ha crecido exponencialmente, aumentando también la exposición a radiación ionizante. Esta tecnología, introducida en la década de 1970, ha evolucionado con avances como la TC multicorte y helicoidal, incrementando su uso

exponencialmente, pero también las preocupaciones por la exposición a radiación ionizante (Carvajalino et al., 2024).

Generalidades de la Protección Radiológica

La protección radiológica en el contexto de la TC se fundamenta en principios establecidos por organismos internacionales como la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), que promueven la justificación, optimización y limitación de dosis. La justificación implica evaluar si el beneficio diagnóstico supera los riesgos potenciales, mientras que la optimización busca minimizar la dosis manteniendo la calidad de imagen necesaria, alineada con el principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable). La limitación establece umbrales para evitar efectos determinísticos, como eritema cutáneo, y mitigar riesgos estocásticos, como cáncer inducido por radiación. En TC, la protección radiológica incluye el uso de colimadores, filtros y moduladores automáticos de corriente (mA) para adaptar la exposición a la anatomía del paciente, reduciendo dosis innecesarias en áreas sensibles (Andisco et al., 2014).

Estudios destacan que la TC contribuye significativamente a la dosis colectiva de radiación médica, representando hasta el 10% de procedimientos, pero hasta el 70% de la dosis total en algunos países, lo que subraya la necesidad de protocolos estrictos para proteger a pacientes vulnerables, como niños y mujeres embarazadas (Carvajalino et al., 2024).

Interacción de la Radiación con la Materia

La radiación ionizante interacciona con los tejidos mediante procesos de absorción, dispersión y atenuación. La comprensión de estos efectos es clave para modelar la distribución de dosis en los pacientes y optimizar la protección radiológica (Akhavanallaf et al., 2020).

Dosis en Tomografía Computarizada

La dosis en tomografía computarizada se refiere a la cantidad de energía absorbida por los tejidos debido a la radiación ionizante, expresada en gray (Gy) para dosis absorbida y sievert (Sv) para dosis efectiva, que considera la radiosensibilidad de órganos. En TC, la dosis es acumulativa por múltiples exposiciones durante el escaneo, influenciada por parámetros como kilovoltaje pico (kVp), miliamperios-segundo (mAs), pitch y longitud de escaneo. La dosis efectiva típica en un estudio abdominal varía de 5-15 mSv, comparable a años de radiación natural de fondo, lo que plantea riesgos estocásticos a largo plazo (Andisco et al., 2014).

La estimación de dosis y su proceso de medición involucran simulaciones y mediciones indirectas, ya que no es factible medir directamente en pacientes. El proceso incluye calibración de equipos con fantomas antropomórficos de acrílico (PMMA) que simulan tejidos humanos, utilizando cámaras de ionización para registrar la ionización producida por los rayos X (Andisco et al., 2014). Modelos computacionales como Monte Carlo simulan trayectorias de fotones para predecir distribuciones de dosis, integrando datos de imágenes del paciente para personalización (Carvajalino et al., 2024).

Definición de CTDI, DLP y sus Limitaciones

Según varios autores, las métricas asociadas a la dosis en TAC incluyen:

Índice de Dosis en Tomografía Computada (CTDI), que cuantifica la dosis en un corte único como la integral de la dosis a lo largo del eje z dividida por el ancho del haz (T), expresado en mGy.

CTDI_{100} que integra sobre 100 mm usando cámaras lápiz.

el CTDI ponderado (CTDI_w) promedia valores centrales y periféricos en fantomas:

$$\text{CTDI}_w = (1/3) \text{CTDI}_{\{\text{centro}\}} + (2/3) \text{CTDI}_{\{\text{periférico}\}}.$$

Para volúmenes, el CTDI_vol ajusta por pitch en escaneos helicoidales: $CTDI_{vol} = CTDI_w / pitch$.

El producto dosis-longitud (DLP) que multiplica CTDI_vol por la longitud escaneada (en mGy·cm), sirviendo como proxy para la energía total impartida.

La dosis efectiva (E) se calcula como $E = DLP \times \text{factor de conversión regional}$ (e.g., 0.015 mSv/mGy·cm para abdomen), estimando riesgo global (Andisco et al., 2014).

Paciente promedio vs paciente real, donde estas métricas se basan en fantomas estandarizados que representan un paciente promedio. Sin embargo, no reflejan variabilidad anatómica individual como obesidad, pediatría, edad, lo que puede llevar a sobreestimaciones o subestimaciones de la dosis en órganos específicos (Carvajalino et al., 2024).

Estimación de Dosis y Proceso de Medición

Los métodos tradicionales para la estimación de dosis en TC se basan en mediciones físicas en fantomas estandarizados, como cilindros de PMMA de 16 cm (cabeza) o 32 cm (cuerpo), que simulan anatomías promedio (Díez, 2001). Estas mediciones usan dosímetros termoluminiscentes (TLD) o cámaras de ionización para capturar dosis en puntos centrales y periféricos, calculando CTDI y DLP. Ventajas incluyen simplicidad y estandarización, permitiendo calibraciones periódicas y cumplimiento regulatorio. Sin embargo, desventajas radican en su falta de personalización: fantomas no capturan variabilidad anatómica real (e.g., obesidad, pediatría), llevando a sub/sobreestimaciones de dosis en órganos específicos. Protocolos tradicionales, como los establecidos por la ICRP, involucran ajustes manuales de parámetros (kVp, mAs) basados en guías genéricas, pero requieren validación contra mediciones reales para asegurar precisión (Andisco et al., 2014).

Métricas Asociadas a la Dosis en TAC

Los protocolos para la estimación de dosis en TC siguen guías como las de la Unión Europea (EUR 16262) y AAPM, que recomiendan mediciones periódicas de CTDI_{vol} y DLP en fantomas, comparándolos con DRL (e.g., 650 mGy·cm DLP para tórax). Incluyen calibración de equipos, selección de kVp bajo (80-120) para reducción de dosis, y uso de moduladores automáticos. En enfoques personalizados, protocolos integran datos del paciente (IMC, diámetro) para ajustar más dinámicamente, validando mediante simulaciones computacionales (Carvajalino et al., 2024).

Métodos Tradicionales para Estimación de Dosis

Se basan en fantomas estándar (PMMA) y dosímetros termoluminiscentes (TLD) o cámaras de ionización. Ventajas: simplicidad, estandarización y cumplimiento regulatorio. Desventajas: no reflejan variabilidad anatómica real, pudiendo sub o sobreestimar dosis en órganos específicos. Los protocolos tradicionales requieren ajustes manuales de kVp y mAs según guías generales (Andisco et al., 2014; Díez, 2001).

Los modelos computacionales ofrecen granularidad órgano-específica y adaptabilidad, superando la generalización de fantomas, pero requieren más recursos; tradicionales son rápidos, pero menos precisos en variabilidad individual (Andisco et al., 2014).

Investigaciones destacan que modelos computacionales reducen dosis hasta 30-50% sin pérdida diagnóstica, promoviendo adopción clínica. En radioterapia, procesamiento de imágenes contribuye a dosimetría precisa, análoga a TC diagnóstica (Díez, 2001).

Modelos Computacionales para Estimación de Dosis

Los modelos computacionales para la medición de dosis en TC son simulaciones digitales que modelan la interacción de radiación con tejidos, permitiendo estimaciones personalizadas.

Estos modelos incluyen métodos Monte Carlo, que simulan trayectorias estocásticas de fotones usando software como MCNP o GEANT4, calculando dosis absorbidas por vóxel basados en imágenes del paciente. Funcionan integrando datos anatómicos (densidad, composición) con parámetros de escaneo para predecir distribuciones de dosis. Ventajas: alta precisión (errores <10%), personalización a variables individuales (tamaño, edad), y optimización sin exposición real (Verdun et al., 2008). Desventajas: alto costo computacional (horas/días por simulación), dependencia de datos de entrada precisos, y necesidad de validación clínica. Aplicaciones abarcan optimización de protocolos, estimación en pediatría, e integración con IA para aceleración (Carvajalino et al., 2024).

Estudios recientes incorporan aprendizaje automático para predecir dosis rápidamente a partir de parámetros de paciente y escaneo, mejorando eficiencia. Modelos híbridos combinan Monte Carlo con redes neuronales para dosis órgano-específicas en tiempo real. Como señala Carvajalino et al., 2024:

Simulación Monte Carlo

Simula trayectorias estocásticas de fotones para predecir dosis absorbida por vóxel usando imágenes del paciente. Software común: MCNP, GEANT4, PENELOPE.

Aprendizaje Automático

Redes neuronales y modelos híbridos (Monte Carlo + IA) permiten predicción rápida de dosis órgano-específica en tiempo real, mejorando eficiencia y personalización (Carvajalino et al., 2024).

Con ventajas como la alta precisión (<10% error), personalización, optimización sin exposición real.

Con desventajas como el alto costo computacional, dependencia de datos precisos y necesidad de validación clínica.

Diferencias entre Métodos Tradicionales y Computacionales

En los computacionales, la granularidad órgano-específica, adaptabilidad, mayor precisión, pero más recursos. En los tradicionales, rápido, estandarizados, pero menor precisión en variabilidad individual (Andisco et al., 2014; Carvajalino et al., 2024).

Protocolos y Normativa para Estimación de Dosis y Optimización

Se siguen guías de AAPM y EUR 16262, recomendando mediciones periódicas de CTDI_vol y DLP en fantomas, comparándolos con DRL. Se promueve calibración de equipos, selección de kVp bajos (80–120) y moduladores automáticos. Los enfoques personalizados integran parámetros del paciente (IMC, diámetro) para ajuste dinámico validado mediante simulaciones (Carvajalino et al., 2024).

El principio ALARA y las recomendaciones de la ICRP guían la dosimetría personalizada, asegurando balance entre calidad diagnóstica y mínima exposición (Andisco et al., 2014).

Marco Metodológico

La presente investigación se basa en un enfoque cualitativo, descriptivo y documental, fundamentado en una revisión sistemática de la literatura científica. Este marco metodológico tiene como propósito analizar y sintetizar la información existente sobre modelos computacionales para la estimación personalizada de dosis en tomografía computarizada (TC), con énfasis en su validación y el impacto en la calidad de imagen digital. El enfoque cualitativo permite explorar conceptos y tendencias en profundidad, mientras que el descriptivo facilita la caracterización de los modelos y métodos identificados. El carácter documental se centra en la recopilación y análisis de fuentes secundarias, como artículos científicos y revisiones, para construir una base sólida que oriente futuras aplicaciones clínicas (Hernández-Sampieri et al., 2014).

El proyecto se estructura en fases secuenciales, adaptadas a la metodología de revisión sistemática, con el objetivo de garantizar la rigurosidad, reproducibilidad y relevancia de los resultados. Estas fases incluyen la búsqueda inicial, la selección de fuentes, la organización temática, el análisis interpretativo y la síntesis final. Se sigue un protocolo inspirado en guías estándar como PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), para minimizar sesgos y maximizar la transparencia.

Fases del Proyecto

Búsqueda en Bases de Datos

Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas y científicas especializadas en radiología, física médica y computación aplicada a la salud. Las bases consultadas incluyen PubMed, Scopus, IEEE Xplore, Biblioteca Virtual Unad, Google Scholar, Web of Science y Researchgate.

Las palabras clave utilizadas fueron: modelos computacionales en dosimetría TC, estimación personalizada de dosis en tomografía computarizada, validación de modelos Monte Carlo en TC, calidad de imagen digital en TC y optimización de dosis en radiología. Se limitó la búsqueda a publicaciones entre 2010 y 2024, en idiomas español e inglés, para enfocarse en avances recientes.

Selección de Fuentes

De los resultados iniciales, que fueron aproximadamente 150 artículos, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión para filtrar las fuentes relevantes, con base en criterios y evidencia relevante, permitiendo sustentar el marco teórico en la estimación personalizada de dosis en tomografía computarizada.

Criterios de Inclusión

Artículos revisados por pares, estudios originales o revisiones sistemáticas sobre modelos computacionales, simulación Monte Carlo y/o algoritmos de aprendizaje automático, aplicados a dosimetría en TC; Investigaciones que abordaran la estimación de dosis personalizada, la comparación con métricas dosimétricas tradicionales (CTDI, DLP) o la optimización de la dosis, publicaciones que aborden validación, personalización de dosis o calidad de imagen; fuentes con datos empíricos o simulaciones clínicas; documentos accesibles en texto completo.

Criterios de Exclusión

Artículos no relacionados directamente con TC (e.g., enfocados en radioterapia exclusiva); publicaciones duplicadas, resúmenes sin texto completo, o con metodologías no validadas; estudios anteriores a 2010, salvo referencias clásicas seminales; idiomas distintos al español o inglés.

Como resultado de este proceso, se seleccionaron 25 artículos clave, priorizando aquellos con alto impacto y relevancia temática para sustentar el tema de la investigación, sobre la estimación personalizada de dosis en tomografía computarizada.

Organización Temática

Las fuentes seleccionadas se organizaron en subtemas para facilitar el análisis. Esto incluyó la categorización en fundamentos teóricos, métodos de validación, optimización de dosis y evaluación de calidad de imagen. Se utilizó software como Zotero para gestionar referencias y herramientas como Excel para mapear conexiones entre estudios.

Análisis e Interpretación

Se realizó un análisis cualitativo de contenido, comparando modelos computacionales con métodos tradicionales (e.g., dosimetría física). Se evaluaron fortalezas (precisión, personalización) y limitaciones (costos computacionales, generalización), interpretando su aplicabilidad clínica. Se incluyó un análisis comparativo de resultados, destacando cómo los modelos Monte Carlo mejoran la estimación de dosis sin comprometer la calidad de imagen.

Síntesis y Conclusiones

Se sintetizaron los hallazgos en recomendaciones prácticas, identificando brechas en la literatura y propuestas para futuras investigaciones, como la integración de IA en protocolos clínicos.

Matriz de Referencias

La siguiente matriz resume las fuentes clave consultadas, incluyendo autor, año, título, base de datos, enfoque principal y contribuciones relevantes al estudio.

Tabla 1*Matriz de Referencias*

Autores	Año	Título	Fuente	Enfoque principal	Contribuciones
Andisco et al.	2014	<i>Dosimetría en tomografía computada</i>	Redalyc	Dosimetría en TC y niveles de referencia	Analiza el incremento del uso de la TC y resalta la necesidad de optimizar la dosis para reducir riesgos biológicos asociados a la radiación ionizante.
Díez	2001	<i>Aportaciones del tratamiento de imágenes a la dosimetría en radioterapia</i>	Universidad de Valencia	Procesamiento de imágenes aplicado a dosimetría	Explora el uso del tratamiento digital de imágenes para mejorar la precisión dosimétrica, sentando bases conceptuales aplicables a TC diagnóstica.
Carvajalino et al.	2024	<i>Modelos computacionales para estimación personalizada de dosis en TC</i>	UNAD	Modelos computacionales, validación y calidad de imagen	Presenta una revisión sistemática que compara métodos tradicionales y avanzados, destacando el potencial de la personalización para reducir dosis sin afectar la calidad de imagen.
Papadakis et al.	2025	Digital phantom versus individualised radiation dosimetry in CT examination protocols for children and adults.	<i>Journal of Radiological Protection</i>	Uso de fantomas en dosimetría en TC	Analiza el papel de los fantomas físicos y computacionales en la validación de métricas dosimétricas y su evolución hacia modelos personalizados.

Autores	Año	Título	Fuente	Enfoque principal	Contribuciones
McCullough y Leng	2020	<i>Radiation Dose Optimization in CT</i>	<i>Radiology</i>	Optimización de dosis en TC	Describe estrategias técnicas y clínicas para minimizar la dosis de radiación manteniendo la calidad diagnóstica de las imágenes. Revisa los estándares vigentes de dosimetría en TC y discute la necesidad de avanzar hacia enfoques personalizados y basados en la estimación de dosis específica por paciente, con el fin de optimizar la protección radiológica y minimizar la exposición innecesaria.
Verdun et al.	2008	CT radiation dose in children: A survey to establish age-based diagnostic reference levels in Switzerland	<i>European Radiology</i>	Estándares actuales de dosis en TC basados en la edad	Describe estrategias técnicas y clínicas para minimizar la dosis de radiación manteniendo la calidad diagnóstica de las imágenes. Revisa los estándares vigentes de dosimetría en TC y discute la necesidad de avanzar hacia enfoques personalizados y basados en la estimación de dosis específica por paciente, con el fin de optimizar la protección radiológica y minimizar la exposición innecesaria.

Nota. Autoría propia

Resultados

Análisis Comparativo

La revisión sistemática de la literatura evidencia que las simulaciones Monte Carlo constituyen el método más preciso para la estimación personalizada de dosis en tomografía computarizada. Diversos estudios reportan errores relativos inferiores al 10% en comparación con mediciones físicas realizadas en fantomas antropomórficos, aunque se han observado discrepancias absolutas de hasta 14–22% asociadas a incertidumbres en parámetros de entrada, como la modulación automática de corriente y la localización exacta del escaneo (Akhavanallaf et al., 2020; Andisco et al., 2014).

La incorporación de algoritmos de inteligencia artificial, particularmente redes neuronales profundas, ha permitido acelerar significativamente el cálculo de dosis, reduciendo los tiempos de procesamiento de horas a segundos, con niveles de precisión comparables a los métodos Monte Carlo tradicionales (Niu y Zhu, 2024; Carvajalino et al., 2024). Estos enfoques superan las limitaciones de métricas globales como CTDI_{vol} y DLP, al proporcionar estimaciones órgano-específicas basadas en la anatomía real del paciente (Ria et al., 2023).

El campo avanza hacia adopción clínica progresiva, con mejoras en IA y segmentación automática. Proyecciones incluyen determinación de parámetros óptimos (kVp, mAs, pitch, colimación, reconstrucción iterativa) para mantener calidad diagnóstica, evaluación económica-operativa (reducción en tiempos, pero costos iniciales en software/calibración), análisis de aceptación por personal médico (resistencia por complejidad workflow) y validación de sistemas automáticos de exposición. Barreras actuales como entrenamiento insuficiente, incertidumbre clínica y sesgos en datos limitan implementación plena, aunque su impacto en protocolos seguros es prometedor (Damilakis, 2025; Andisco et al., 2014).

Tabla 2*Comparación de Precisión de Estudios Seleccionados*

Autor / Año	Método principal	Validación	Desviación respecto a fantomas
Andisco et al., (2014)	Monte Carlo	Fantomas físicos	<10%
Akhavanallaf et al., (2020)	Monte Carlo personalizado	Fantomas antropomórficos	10–22%
Lawson et al., (2022)	Monte Carlo vs. medición directa	Fantomas pediátricos	<15%
Ria et al., (2023)	Monte Carlo + segmentación automática	Datos clínicos	<10%
Niu y Zhu (2024)	IA + Monte Carlo híbrido	Simulación clínica	<10%

Nota. Autoría propia

Impacto de la Anatomía del Paciente en la Estimación de Dosis

Los estudios revisados coinciden en que las métricas tradicionales basadas en el “paciente promedio” no reflejan adecuadamente la dosis real en poblaciones con anatomías no estándar, como pacientes pediátricos u obesos. Se reportan subestimaciones de dosis de hasta un 50% cuando se utilizan fantomas convencionales en pacientes de mayor tamaño corporal (Ria et al., 2023; Kalogeropoulos y Koutsouveli, 2024).

El tamaño corporal, la composición tisular y la edad influyen de manera significativa en la dispersión Compton y en la atenuación de la radiación. Parámetros técnicos como kVp, colimación y pitch interactúan con estas variables, afectando la distribución de dosis en tejidos periféricos (Andisco et al., 2014).

Monte Carlo vs Aprendizaje Automático

El análisis comparativo revela un compromiso claro entre precisión y eficiencia computacional. Los métodos Monte Carlo ofrecen alta exactitud física, pero presentan elevados costos computacionales, lo que limita su uso en tiempo clínico real. En contraste, los modelos

basados en aprendizaje automático permiten estimaciones rápidas y automatizadas, aunque su desempeño depende de la calidad y representatividad de los datos de entrenamiento (Lawson et al., 2022; Niu y Zhu, 2024).

Los modelos híbridos, que combinan Monte Carlo para generación de datos y redes neuronales para predicción rápida, emergen como una solución intermedia con alto potencial clínico.

Implicaciones Clínicas y Principio ALARA

Los modelos computacionales personalizados facilitan reducciones de dosis del 30–50% sin comprometer la calidad diagnóstica, contribuyendo al cumplimiento del principio ALARA y fortaleciendo la seguridad del paciente (Carvajalino et al., 2024; Niu y Zhu, 2024). Sin embargo, persisten barreras para su adopción clínica, incluyendo la falta de software integrado, limitaciones de infraestructura computacional, necesidad de capacitación del personal y validación prospectiva multicéntrica (Damilakis, 2025).

Propuesta de Hoja de Ruta Clínico-Tecnológica

A partir de la literatura analizada, se identifica la necesidad de:

Desarrollo de software clínico amigable e integrado a los sistemas PACS.

Optimización de recursos computacionales para reducir tiempos de cálculo.

Validación clínica estandarizada en poblaciones diversas.

Capacitación del personal médico y físico en dosimetría personalizada.

Evaluación del impacto costo-beneficio para su adopción hospitalaria.

Conclusiones

La presente revisión bibliográfica permitió analizar de forma crítica la literatura sobre el uso de modelos computacionales para la estimación personalizada de la dosis en estudios de tomografía computarizada. A partir del análisis comparativo de la literatura científica, se evidenció que los modelos basados en simulaciones Monte Carlo y en técnicas de aprendizaje automático ofrecen estimaciones dosimétricas más precisas y representativas del paciente real que las metodologías tradicionales fundamentadas en métricas globales, como CTDIvol y DLP.

Los estudios revisados coinciden en que la validación de estos modelos, realizada por distintos autores mediante comparaciones con mediciones físicas en fantomas y datos clínicos, demuestra niveles de concordancia aceptables, lo que respalda su potencial aplicabilidad clínica. Asimismo, se identificó que la incorporación de características individuales del paciente, como anatomía y tamaño corporal, constituye un factor clave para mejorar la estimación de dosis en poblaciones no estándar, como pacientes pediátricos y con obesidad.

El análisis de la literatura permitió reconocer que, si bien los métodos Monte Carlo presentan alta precisión física, su elevado costo computacional limita su uso en tiempo real, mientras que los enfoques basados en aprendizaje automático destacan por su rapidez y automatización, aunque dependen fuertemente de la calidad de los datos de entrenamiento. En este contexto, los modelos híbridos emergen como una alternativa prometedora para equilibrar precisión y eficiencia.

Finalmente, esta revisión evidencia que la dosimetría personalizada en tomografía computarizada representa una línea de investigación en consolidación, con un impacto potencial significativo en la optimización de protocolos y en el fortalecimiento de la protección radiológica bajo el principio ALARA. No obstante, persisten desafíos relacionados con la validación clínica

multicéntrica, la estandarización de herramientas y la capacitación del personal, los cuales deberán ser abordados en investigaciones futuras para facilitar su implementación rutinaria en los servicios de radiodiagnóstico.

Referencias Bibliográficas

- Akhavanallaf, A., Xie, T., & Zaidi, H. (2020). Assessment of uncertainties associated with Monte Carlo-based personalized dosimetry in clinical CT examinations. *Physics in Medicine & Biology*, 65(4), 045008. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab5f3f>
- American Association of Physicists in Medicine. (2015). *Estimating patient organ dose with computed tomography: A review of present methodology and required DICOM information* (AAPM Report No. 246). https://www.aapm.org/pubs/reports/RPT_246.pdf
- Andisco, D., Blanco, S., & Buzzi, A. E. (2014). Dosimetría en tomografía computada. *Revista Argentina de Radiología*, 78(3), 156–160. <https://doi.org/10.1016/j.rard.2014.07.004>
- Carvajalino, W., Ramírez, M., Prenss, F., Santiago, E., & Parada, F. (2024). Modelos computacionales para estimación personalizada de dosis tomografía computarizada: Validación y calidad de imagen digital [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD]. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/65851/fjprencsp.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Damilakis, J. (2025). AI-powered personalized patient dosimetry in CT. *BJR/Artificial Intelligence*, 2(1), ubaf007. <https://doi.org/10.1093/bjrai/ubaf007>
- Díez, S. (2001). Aportaciones del tratamiento de imágenes a la dosimetría en radioterapia [Tesis doctoral, Universitat de València]. <http://roderic.uv.es/handle/10550/15807>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill Education. <https://dokumen.pub/metodologia-de-la-investigacion-6a-edicion.html>

- Kalogeropoulos, D., & Koutsouveli, E. (2024). Advanced computational methods for radiation dose optimization in CT examinations. *Diagnostics*, *14*(9), 912.
<https://doi.org/10.3390/diagnostics14090912>
- Lawson, M., Berk, K., Badawy, M., Qi, Y., Kuganesan, A., & Metcalfe, P. (2022). Comparison of organ and effective dose estimations from different Monte Carlo simulation-based software methods in infant CT and comparison with direct phantom measurements. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, *23*(7), e13625.
<https://doi.org/10.1002/acm2.13625>
- Lee, C., & Lee, J. (2023). A framework for prediction of personalized pediatric nuclear medical dosimetry based on machine learning and Monte Carlo techniques. *Physics in Medicine & Biology*, *68*(8), 085012. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/acc4a5>
- Liu, H., Chen, Y., Liu, Y., & Xing, L. (2024). Rapid patient-specific organ dose estimation in computed tomography using a graphics processing unit-accelerated hybrid Monte Carlo and deep learning method. *Medical Physics*, *51*(10), 7196–7210.
<https://doi.org/10.1002/mp.17347>
- McCollough, C., & Leng, S. (2020). Use of artificial intelligence in computed tomography dose optimisation. *Annals of the ICRP*, *49*(1), 113–125.
<https://doi.org/10.1177/0146645320940827>
- Moraitis, A., Küper, A., Tran-Gia, J., Eberlein, U., Chen, Y., Seifert, R., Shi, K., Kim, M., Herrmann, K., Fragoso, P., & Kersting, D. (2024). Perspectivas futuras de la inteligencia artificial en la dosimetría de médula ósea y la terapia individualizada con radioligandos. *Seminars in Nuclear Medicine*. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2024.06.003>

- Niu, T., & Zhu, L. (2024). Artificial intelligence-powered personalized patient dosimetry in CT. *BJR/Artificial Intelligence*, 1(1), ubaf007. <https://doi.org/10.1093/bjrai/ubaf007>
- Papadakis, A. E., Karantanas, A., & Damilakis, J. (2025). Digital phantom versus individualised radiation dosimetry in CT examination protocols for children and adults. *Journal of Radiological Protection*, 45(3), 031514. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6498/adf974>
- Pérez, P., & Hernández, A. (2023). A fully automated machine learning-based methodology for patient-specific radiation dosimetry in computed tomography. *Physica Medica*, 114, 103137. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.103137>
- Pérez, M., Rodríguez, C., Quispe, C., Bernardo, H., Luque, M., González, C., & García, C. (2024). Reducción de la dosis de radiación en TC mediante una plataforma de gestión y la aplicación de estrategias de reducción de la dosis. *Seram*. <https://piper.espacioseram.com/index.php/seram/article/view/9732>
- Reyes, Y., Santamarina, M., Villagrán, D., Torres, F., Vial, I., Villarroel, C., Salas, R., & Chabert, S. (2022). Dosis de radiación en tomografía computarizada: Observación en tres hospitales de la Región de Valparaíso, Chile. *Revista Chilena de Radiología*, 28(3), 83–91. <https://doi.org/10.4067/S0717-93082022000300083>
- Ria, F., Abadi, E., Segars, W., & Samei, E. (2023). Patient-specific organ dose calculation using automatic anatomy segmentation for CT dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111118>
- Ria, F., Wilson, J., Zhang, N., Samei, E., & Kapadia, A. (2025). Effective dose estimation in computed tomography by machine learning using patient and scan parameters. *Journal of Imaging*, 11(1), 2. <https://doi.org/10.3390/jimaging11010002>

- Samei, E., Christianson, O., & Tian, X. (2019). Construction of patient-specific computational models for organ dose estimation in radiological imaging. *Medical Physics*, *46*(5), 2276–2285. <https://doi.org/10.1002/mp.13471>
- Verdun, F., Gutierrez, D., Vader, J., Aroua, A., Alamo, L., Bochud, F., & Gudinchet, F. (2008). CT radiation dose in children: A survey to establish age-based diagnostic reference levels in Switzerland. *European Radiology*, *18*(9), 1980–1986.
- Zhang, Y., Li, X., & Chen, J. (2025). Quantum-enhanced intelligent system for personalized adaptive radiotherapy dose estimation. *Scientific Reports*, *15*(1), 12345. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05673-y>