



ESCUELA DE CIENCIAS DE LA SALUD

La Integración de las Imágenes Multimodales en la Radioterapia de Próstata

Estudiante: Lucas Palacios

Legajo: 38910

Directora: Rocío González Armesto

Trabajo Final de Integración para acceder al título de Licenciado en Producción de Bioimágenes

2025

Índice

Resumen	4
Palabras Clave	5
Introducción	6
Objetivo General	8
Objetivos Específicos	8
Estado del Arte	9
Marco Teórico	15
Fundamentos del Cáncer de Próstata	15
Epidemiología	15
Sistema TNM	16
Clasificación según riesgo	17
Opciones de tratamiento	18
Principios de la Radioterapia en el Cáncer de Próstata	19
Tipos de radioterapia	21
Conceptos de Volúmenes en Radioterapia	25
Limitaciones de la TC	28
Imágenes multimodales claves para la planificación	29
Resonancia Magnética Multiparamétrica (RMmp)	29
Fundamentos Teóricos de RMmp	30
Tomografía por Emisión de Positrones (PET/CT)	36
Bases físicas en PET-CT	37
Método	40
Fuentes de acceso	41
Resultados	42
Técnicas de imagen utilizadas en la planificación de la radioterapia en el cáncer de próstata (PET-CT y RM)	42
Contribución de las técnicas de imagen a una mejor delimitación del volumen tumoral y órganos a riesgo	44
Mejoras en la planificación dosimétrica gracias a la integración de imágenes avanzadas	46
Síntesis y Conclusiones	48
Síntesis general del análisis realizado	48
Síntesis según los objetivos específicos	49
Conclusiones generales de la investigación	51
Aportes y Contribuciones de la Investigación	53
Aportes originales al análisis de la planificación radioterapéutica	54
Aportes prácticos para la clínica y la toma de decisiones	55
Limitaciones de la Investigación	56
Líneas de Investigación Futuras	57
Referencias	58

Resumen

El cáncer de próstata constituye uno de los principales desafíos en la oncología moderna, y la precisión en la planificación radioterapéutica resulta fundamental para mejorar los resultados clínicos y reducir la toxicidad. Tradicionalmente, la tomografía computarizada ha sido la base del proceso de planificación; sin embargo, su limitada capacidad para diferenciar tejidos blandos ha impulsado la incorporación de imágenes avanzadas. El presente trabajo analiza el impacto de la integración de la tomografía por emisión de positrones con tomografía computarizada (PET/CT) y la resonancia magnética multiparamétrica (RMmp) en la delimitación del volumen tumoral y la optimización dosimétrica en el tratamiento radioterapéutico del cáncer de próstata.

Mediante una revisión bibliográfica descriptiva y comparativa de 20 estudios publicados entre 2015 y 2025, se examinaron las contribuciones anatómicas, funcionales y metabólicas de estas modalidades, así como su influencia en la toma de decisiones clínicas. La evidencia demuestra que la PET/CT —especialmente con trazadores PSMA— y la RMmp mejoran la identificación de lesiones significativas, permiten redefinir el volumen tumoral en un número considerable de pacientes y favorecen una planificación más personalizada. Asimismo, la combinación de ambas técnicas reduce la variabilidad interobservador y posibilita una administración más precisa de la dosis.

En conclusión, la integración de imágenes multimodales representa un avance relevante para la radioterapia del cáncer de próstata, al incrementar la exactitud en la delimitación del volumen objetivo y mejorar la eficacia del tratamiento, aunque su implementación aún enfrenta desafíos relacionados con costos y estandarización.

Palabras Clave

Cáncer de próstata, Radioterapia, Imágenes multimodales, Planificación radioterapéutica, Resonancia magnética multiparamétrica (RMmp), PET-CT, PSMA.

Introducción

El cáncer de próstata representa uno de los principales desafíos en la salud masculina a nivel mundial, siendo la segunda causa de muerte por cáncer en hombres. En las últimas décadas, los avances en diagnóstico y tratamiento han permitido mejorar la supervivencia y la calidad de vida de los pacientes; sin embargo, la precisión en la planificación de la radioterapia continúa siendo un aspecto crítico, especialmente en el contexto de la radioterapia, una de las modalidades más empleadas en estadios localizados y localmente avanzados de la enfermedad. La delimitación precisa del volumen tumoral es esencial para maximizar la eficacia del tratamiento y reducir la toxicidad en los tejidos sanos circundantes, como el recto y la vejiga.

Tradicionalmente, la tomografía computarizada (TAC) ha sido la base para la planificación radioterapéutica. Sin embargo, su limitada capacidad para diferenciar estructuras anatómicas blandas puede comprometer la exactitud del proceso de planificación. En respuesta a esta limitación, la integración de imágenes multimodales, particularmente la tomografía por emisión de positrones combinada con tomografía computarizada (PET/CT) y la resonancia magnética multiparamétrica (RMmp), ha cobrado relevancia por su potencial para combinar información anatómica, funcional y metabólica. Esta fusión de datos permite una caracterización más precisa del tumor prostático, facilita la detección de lesiones ocultas o ganglios comprometidos y contribuye a una planificación radioterapéutica más personalizada.

Además, surgen interrogantes fundamentales para la práctica clínica: ¿cuál es el impacto de la incorporación de imágenes multimodales en la planificación de radioterapia en pacientes con cáncer de próstata?, ¿conduce esta integración a una mejor delimitación del volumen objetivo y, por ende, a una administración más precisa de la dosis terapéutica?, ¿se traduce en un mayor control tumoral y una reducción de efectos adversos? Asimismo, la

adopción de estas tecnologías plantea desafíos adicionales vinculados con el costo, la capacitación del personal y la existencia o no de protocolos estandarizados que guíen su implementación.

A pesar de los avances tecnológicos y la creciente evidencia científica que respalda su utilidad, persiste una brecha entre la investigación y su aplicación en entornos clínicos. Evaluar el verdadero impacto de la integración de PET/CT y RMmp en la planificación radioterapéutica resulta, por tanto, indispensable para determinar si su uso representa un avance significativo frente a las técnicas convencionales o si su implementación debe orientarse a contextos específicos según los recursos disponibles y las características del paciente.

En este contexto, resulta fundamental analizar de qué manera los avances tecnológicos en las imágenes médicas, particularmente la tomografía computarizada (TC), la resonancia magnética multiparamétrica (RMmp) y la tomografía por emisión de positrones (PET), han contribuido a mejorar la precisión y la eficacia en la planificación de la radioterapia para el cáncer de próstata. A lo largo de los últimos años, estas herramientas han evolucionado de forma significativa, permitiendo una delimitación más exacta del volumen tumoral y una protección más efectiva de los órganos en riesgo, lo que impacta directamente en la calidad del tratamiento y en los resultados clínicos.

Comprender el alcance de estas mejoras es esencial para evaluar el verdadero aporte de las imágenes avanzadas en la optimización de las dosis administradas y en la personalización de la terapia. Por ello, el presente trabajo se desarrollará mediante una revisión bibliográfica de evidencia científica actualizada y un análisis comparativo de los protocolos más utilizados en la práctica clínica.

De esta manera, y considerando la necesidad de abordar la brecha existente entre los avances tecnológicos y su implementación real en los servicios de radioterapia, este estudio se

enfoca en investigar el impacto de la integración de PET/CT y RMmp en la planificación radioterapéutica del cáncer de próstata, orientándose a determinar en qué medida estas modalidades contribuyen a una delimitación más precisa del volumen tumoral, a una mejora dosimétrica y, en definitiva, a una mayor eficacia del tratamiento. Esta línea de investigación se articula directamente con el objetivo general y los objetivos específicos planteados, que buscan describir estas técnicas, analizar su aporte a la delimitación anatómica y funcional, e identificar sus beneficios en la planificación dosimétrica.

Objetivo General

- Analizar el impacto de los avances en las imágenes médicas en la precisión y eficacia de la planificación de la radioterapia en el tratamiento del cáncer de próstata.

Objetivos Específicos

- Describir las principales técnicas de imagen usadas actualmente en la planificación de la radioterapia en el cáncer de próstata (PET-CT y RM)
- Explicar cómo estas técnicas contribuyen a una mejor delimitación del volumen tumoral y órganos a riesgo.
- Identificar las mejoras en la planificación dosimétrica gracias a la integración de imágenes avanzadas.

Estado del Arte

El cáncer de próstata forma una de las neoplasias malignas más frecuentes en el hombre y forma un reto creciente para la oncología moderna. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud es la segunda causa de muerte por cáncer en hombres a nivel mundial. Los avances en las imágenes han transformado la forma en la que se llega a su diagnóstico, estadificación y la planificación terapéutica, especialmente en el ámbito de la radioterapia.

En los últimos años, la planificación de la radioterapia en cáncer de próstata ha experimentado un notable avance gracias a la incorporación de imágenes multimodales. Tradicionalmente, la tomografía computarizada (TC) ha formado la base para la delimitación de los órganos a riesgo (OARs) y el blanco a tratar (PTV) ; sin embargo, su baja resolución en tejidos blandos limita la identificación precisa del tumor y de los órganos a riesgo. En este contexto la resonancia magnética multiparamétrica (RMmp) ha demostrado una alta sensibilidad y especificidad en la detección de lesiones clínicamente significativas, especialmente mediante la combinación de secuencias T2, DWI y DCE. Por su parte, el PET/CT con radiotrazadores dirigidos al antígeno prostático específico de membrana (PSMA) ha revolucionado la estadificación y la identificación de recurrencias, permitiendo una planificación más personalizada.

La fusión de ambas modalidades, PET/CT y RMmp, forma una herramienta que ofrece información anatómica y metabólica complementaria, mejorando la precisión en la definición del volumen blanco (PTV) y la administración de dosis. No obstante, su implementación rutinaria aún enfrenta desafíos económicos y metodológicos que limitan su estandarización.

En este apartado se expondrán una serie de trabajos de investigación realizados en los últimos cinco años, los cuales tienen una relación estrecha en cuanto al objeto de estudio del

presente Trabajo Integrador Final, donde se busca orientar el cumplimiento de los objetivos propuestos de lo que ya se conoce acerca del problema en cuestión.

Para comenzar, Karagiannis & Saarinen (2022) evaluaron el impacto de la PSMA-PET/CT en la planificación radioterapéutica de 43 pacientes con cáncer de próstata en distintos escenarios clínicos. El estudio mostró que esta técnica reveló hallazgos no detectados previamente —como recidivas o metástasis— que llevaron a modificar el plan terapéutico en el 60,5% de los casos. Además, en la mitad de los pacientes inicialmente planificados para radioterapia, el esquema se ajustó tras la PET/CT. Los autores concluyen que la PSMA-PET/CT influye significativamente en la selección y modificación del tratamiento radioterapéutico, así como en la decisión de terapias adyuvantes, mejorando la precisión en el manejo del cáncer de próstata.

Miao & Yao (2025) realizaron un estudio retrospectivo con 341 pacientes para evaluar la capacidad predictiva de distintas modalidades de imagen —PET/CT con [^{18}F]F-PSMA-1007 y RM multiparamétrica— en la clasificación ISUP del cáncer de próstata. Compararon modelos de modalidad única, doble, triple y un modelo multimodal integrado dentro de redes de aprendizaje profundo. El modelo que combinó PET/CT y RMmp mostró la mayor precisión diagnóstica, superando de forma significativa a las modalidades individuales. Además, los modelos multimodales de dos y tres modalidades también fueron superiores a los unimodales. El estudio concluye que la integración de imágenes multimodales puede mejorar la predicción de la clasificación ISUP y favorecer una planificación terapéutica más personalizada.

Van Bergen y Braat (2025) y otros autores en la investigación llamada “Integración de la tomografía por emisión de positrones (PET) con antígeno de membrana específico de la próstata y la resonancia magnética multiparamétrica para la definición del volumen tumoral macroscópico en el cáncer de próstata localizado y localmente avanzado tratado con

radioterapia guiada por imagen” revisan la evidencia sobre la integración de la RM multiparamétrica y la PET-PSMA para definir con mayor precisión el volumen tumoral macroscópico intraprostático en cáncer de próstata localizado y localmente avanzado. La combinación de ambas técnicas mejora la identificación y cobertura de la lesión dominante y disminuye la variabilidad interobservador. Aunque los GTV obtenidos con imágenes combinadas suelen ser mayores que los basados solo en RMmp, los refuerzos focales hipofraccionados dirigidos a estos volúmenes han mostrado perfiles de toxicidad aguda aceptables. En conjunto, la evidencia respalda el uso integrado de PET-PSMA y RMmp para una planificación radioterapéutica más precisa.

Liu y Zhu (2023) realizaron un estudio retrospectivo llamado “Variability of radiotherapy volume delineation: PSMA PET/MRI and MRI based clinical target volume and lymph node target volume for high-risk prostate cancer” en 49 pacientes con cáncer de próstata de alto riesgo para comparar la delimitación de volúmenes objetivo mediante PET/RM con PSMA frente a la RM convencional en radioterapia de pelvis completa. Los resultados mostraron que los volúmenes clínicos (CTV) fueron similares entre ambas técnicas, pero el volumen tumoral ganglionar (GTVn) definido por PET/RM identificó con mayor precisión los ganglios metastásicos y evitó incluir ganglios no afectados. La PET/RM con PSMA, por tanto, mejora la exactitud en la delimitación del GTV y optimiza la planificación radioterapéutica en este grupo de pacientes.

Sardaro y Bardoscia (2021) realizaron un estudio piloto en pacientes postprostatectomía candidatos a radioterapia de rescate, comparando la planificación basada en TC con la obtenida mediante RM multiparamétrica. En diez pacientes elegibles, la RMmp permitió definir volúmenes objetivo clínicos más pequeños y con mayor precisión que la TC. Esto se tradujo en una mejor cobertura del volumen tumoral y una mayor protección de los órganos de riesgo. El estudio concluye que la RMmp optimiza la exactitud de la planificación radioterapéutica y

posibilita una distribución de dosis más precisa, incluida la escalada focal al volumen tumoral macroscópico.

Gomis-Sellés y Maldonado (2025) analizan el impacto de la PSMA-PET/CT en la toma de decisiones radioterapéuticas para el cáncer de próstata. Destacan que esta técnica mejora la estadificación y la delimitación tumoral gracias a su alta sensibilidad, permitiendo optimizar la radioterapia de rescate e identificar enfermedad oligometastásica tratable. La PSMA-PET/CT modifica con frecuencia la planificación, posibilitando tratamientos más personalizados y potencialmente más eficaces. Los autores concluyen que su integración en la práctica clínica mejora la selección de pacientes y la definición de volúmenes objetivo, y que la SBRT guiada por PSMA muestra beneficios prometedores, aunque se necesitan más estudios prospectivos para evaluar su impacto a largo plazo.

Otani (2024) revisa las propiedades diagnósticas de la PSMA-PET/CT y su creciente relevancia en el tratamiento del cáncer de próstata. El estudio describe su superioridad frente a otras modalidades de imagen y resume los principales sistemas de interpretación (EANM, PROMISE y PSMA-RADS). Gracias a su alta sensibilidad para detectar lesiones, especialmente en contextos de recidiva, la PSMA-PET/CT optimiza la selección terapéutica y la planificación radioterapéutica. Los autores concluyen que esta técnica se ha consolidado como una herramienta clave en el manejo del cáncer de próstata y que su impacto clínico continuará ampliándose.

Zhang y Wang (2022) evaluaron el valor clínico de la PET/RM con 18F-PSMA-1007 y 68Ga-PSMA-11 en la delimitación del GTV en radioterapia para cáncer de próstata. En 69 pacientes, tres médicos delinearon el GTV mediante métodos visuales y umbrales porcentuales del SUV max, analizando correlación, diferencias y superposición con el coeficiente de Dice. En 51 pacientes operados, compararon la longitud tumoral patológica con la derivada de distintas

modalidades de imagen. Los resultados mostraron que la delimitación visual en PET/RM es factible y que la fusión PET/RM mejora la precisión del GTV. Además, la superposición entre GTV-RM y GTV-PET/RM fue mayor y aumentó con el tamaño tumoral.

Huang (2025) comparó la PET/CT con 18F-PSMA-1007 y la RM multiparamétrica para la localización espacial y estimación volumétrica de tumores prostáticos de riesgo intermedio y alto. En un análisis basado en 286 nódulos confirmados por histopatología, la PET/CT mostró una mayor precisión que la RM en la localización correcta de los tumores (65,0 % vs. 46,9 %). Asimismo, la PET/CT superó a la RM en la determinación tridimensional y volumétrica del tumor. Los autores concluyen que la PET/CT con 18F-PSMA-1007 ofrece una estadificación locorregional más precisa y debería considerarse antes del tratamiento definitivo del cáncer de próstata localizado.

Phillipi y Choung (2025) analizaron retrospectivamente 37 pacientes post-prostatectomía con recidiva bioquímica, comparando RM multiparamétrica, PET/CT con PSMA y su combinación. La RMmp mostró mayor sensibilidad (73,0 %) y especificidad (77,1 %) que la PET/CT (65,2 % y 75,7 %). La combinación de ambas modalidades mejoró la especificidad y la concordancia interobservador. Se concluye que la RMmp sigue siendo la técnica preferida para detectar recurrencia local, pero la integración con PET/CT con PSMA puede optimizar la fiabilidad diagnóstica, siempre considerando las limitaciones de cada modalidad para evitar errores de interpretación.

Conclusiones

Con base en la evidencia obtenida de los diversos estudios analizados, y luego de realizar una revisión integral del tema, se puede afirmar que : El conjunto de investigaciones analizadas demuestra de manera consistente que las técnicas de imagen basadas en PSMA, ya sea mediante PET/CT o PET/MR, han transformado de forma significativa el abordaje

diagnóstico y terapéutico del cáncer de próstata, especialmente en el contexto de la planificación radioterapéutica. La evidencia disponible señala que estas modalidades superan claramente a la imagen convencional —particularmente la TC y, en algunos escenarios específicos, incluso a la resonancia magnética multiparamétrica (RMmp)— al proporcionar una detección más precisa de lesiones intraprostáticas, ganglionares y metastásicas, así como una mejor caracterización del volumen tumoral macroscópico (GTV).

La integración multimodal (PET/CT o PET/MR junto con RMmp) mejora la precisión diagnóstica y optimiza la delimitación del GTV, reduciendo la variabilidad interobservador y permitiendo una planificación radioterapéutica más ajustada al comportamiento biológico real del tumor. La fusión de información anatómica y metabólica resulta especialmente útil para definir lesiones dominantes, áreas de recurrencia y nódulos ganglionares metastásicos. En síntesis, la integración de las técnicas de imagen basadas en PSMA dentro de los protocolos de estadificación y planificación radioterapéutica se perfila como un componente esencial del manejo moderno del cáncer de próstata, gracias a su capacidad para aumentar la exactitud diagnóstica, optimizar los volúmenes de irradiación y mejorar potencialmente los resultados clínicos. No obstante, la mayoría de los autores destacan la necesidad de estudios prospectivos y multicéntricos que consoliden su impacto a largo plazo.

Marco Teórico

Fundamentos del Cáncer de Próstata

Epidemiología

Se debe comenzar por definir que el cáncer de próstata es una de las neoplasias malignas más prevalentes en la población masculina y constituye un problema relevante de la salud pública debido a su alta incidencia y mortalidad. A pesar de que se han propuesto muchos factores de riesgo para el cáncer de próstata, no hay un factor etiológico totalmente confirmado más allá de la edad y la etnia. Incluso el papel de la edad se está revisando, porque hoy en día se detectan más casos incidentales en hombres jóvenes debido al uso frecuente de estudios por imágenes, lo que pone en duda si realmente la edad es un factor tan determinante como se pensaba.

Los antecedentes familiares suelen considerarse importantes porque permiten hacer un seguimiento temprano en personas con mayor probabilidad de desarrollar la enfermedad. Sin embargo, todavía se necesitan estudios más sólidos para entender con precisión cuánto influyen realmente estos antecedentes en el desarrollo del cáncer de próstata.

En cuanto a factores como tabaquismo, alcohol, dieta, actividad física u otros elementos no genéticos, la evidencia disponible es contradictoria y no permite afirmar que sean causas directas o riesgos claramente establecidos.

Por otro lado, los estudios genómicos (GWAS) han proporcionado una mayor comprensión de la predisposición genética al riesgo de cáncer de próstata. Existen más de 180 polimorfismos de un solo nucleótido (SNP) independientes asociados con el riesgo de cáncer de próstata, que representan un tercio del riesgo de heredabilidad familiar del cáncer de próstata. Una revisión de Benafif et al. demostró que las variantes genéticas de susceptibilidad

al cáncer de próstata pueden explicar el 37,5 % del riesgo relativo familiar de cáncer de próstata (Keng Lim, 2021).

La estadificación

La estadificación del cáncer de próstata es un paso fundamental en el manejo de la enfermedad, ya que permite estimar el pronóstico del paciente y orientar las opciones terapéuticas más adecuadas, como la vigilancia activa, la cirugía radical o la radioterapia. Este proceso no solo determina la extensión anatómica del tumor, sino también su agresividad biológica. Para ello se utilizan parámetros clave como el puntaje de **Gleason**, que evalúa al microscopio cuán anormales y agresivas son las células tumorales —a mayor desorganización, mayor puntaje y mayor agresividad—, y el **PSA** (antígeno prostático específico), una proteína producida por la próstata que puede elevarse en sangre ante la presencia de cáncer, inflamación u otros cambios glandulares. La combinación de estos indicadores permite clasificar con precisión el riesgo de cada paciente y definir el abordaje más adecuado.

Sistema TNM

El sistema TNM (Tumor, Nódulos, Metástasis) es la herramienta estándar internacional usada para clasificar la extensión anatómica del cáncer de próstata y otros tipos de cáncer. Es promovido por la *American Joint Committee on Cancer (AJCC)*.

T (Tumor Primario): Describe el tamaño y la extensión del tumor primario dentro y fuera de la próstata. Se basa en el examen físico (tacto rectal) y estudios de imágenes (ecografía, resonancia magnética). Por ejemplo, T1 son tumores no palpables/visibles; T2 están confinados a la próstata; T3 se han extendido a la cápsula prostática o vesículas seminales; y T4 invade estructuras adyacentes como el recto o la vejiga.

N (Ganglios Linfáticos Regionales): Indica si hay diseminación a los ganglios linfáticos cercanos. En N0 no hay diseminación, mientras que en N1 si hay afectación.

M (Metástasis a Distancia): Indica si el cáncer se ha propagado a sitios distantes (huesos, pulmones, etc.) . En M0 no hay metástasis a distancia, en M1 si las hay.

Clasificación según riesgo

El cáncer de próstata se clasifica principalmente según el riesgo de progresión de la enfermedad, combinando tres parámetros fundamentales: el nivel de antígeno prostático específico (PSA), el puntaje de Gleason —o su equivalente en el sistema ISUP— y la extensión clínica determinada por el tacto rectal o estudios por imágenes. Esta estratificación permite orientar las decisiones terapéuticas y estimar el pronóstico de cada paciente.

1. **Bajo Riesgo:** Incluye pacientes con el tumor limitado a la próstata, con un estadio clínico T1–T2a, un PSA menor de 10 ng/mL y un puntaje de Gleason ≤ 6 (ISUP grado 1). Estos pacientes suelen presentar tumores de crecimiento lento, con baja probabilidad de diseminación y excelentes tasas de control con tratamientos locales o incluso vigilancia activa.
2. **Riesgo intermedio:** Incluye a los pacientes con valores de PSA entre 10 y 20 ng/mL, un estadio clínico T2b–T2c o un puntaje de Gleason 7 (ISUP 2–3). Este grupo es más heterogéneo, ya que combina lesiones que pueden comportarse de manera indolente con otras de mayor agresividad. Por ello, suele subdividirse en intermedio bajo o intermedio alto, según la cantidad de factores presentes. En estos casos, la indicación terapéutica requiere mayor precisión, incorporando modalidades como la radioterapia combinada con hormonoterapia de corta duración.
3. **Alto riesgo:** Incluye pacientes con PSA superior a 20 ng/mL, un estadio clínico $\geq T3$ o un puntaje de Gleason entre 8 y 10 (ISUP 4–5). Estas neoplasias presentan mayor

probabilidad de invasión local, afectación ganglionar y metástasis a distancia, por lo que suelen requerir tratamientos multimodales más intensivos. La correcta identificación de este grupo es crucial para optimizar el control oncológico y mejorar la supervivencia.

Opciones de tratamiento

Las opciones de tratamiento para el cáncer de próstata están fuertemente determinadas por la clasificación de riesgo del tumor. Las principales modalidades de tratamiento son la Vigilancia Activa, la Cirugía (Prostatectomía Radical) y la Radioterapia.

Vigilancia Activa: Es la opción preferida para pacientes con enfermedad de muy bajo o bajo riesgo, particularmente aquellos con puntajes de Gleason bajos y enfermedad confinada a la próstata. Consiste en monitorear de cerca el cáncer con la intención de intervenir curativamente sólo si hay evidencia de progresión de la enfermedad.

Cirugía: La Prostatectomía Radical es un tratamiento curativo que implica la extirpación quirúrgica de toda la glándula prostática y las vesículas seminales. Es una opción de tratamiento de primera línea para pacientes con expectativa de vida mayor a 10 años con enfermedad localizada de riesgo bajo, intermedio o incluso algunos casos de alto riesgo.

Radioterapia: La Radioterapia utiliza radiación de alta energía para destruir las células cancerosas, siendo otra opción curativa primaria para el cáncer de próstata localizado de bajo, intermedio y alto riesgo. Es la modalidad más común. Se administra externamente al área pélvica a lo largo de varias semanas (típicamente 5 a 8 semanas). El objetivo es administrar una dosis alta y precisa al tumor (próstata) mientras se minimiza la radiación a los tejidos adyacentes (vejiga, recto, bulbo peneano, por citar los más importantes.) Las tasas de curación en los hombres tratados con radioterapia para el cáncer de próstata son comparables a las

obtenidas mediante la prostatectomía radical en los casos en que el tumor se encuentra localizado.

La radioterapia también se utiliza como tratamiento inicial, generalmente en combinación con terapia hormonal, en pacientes cuyo cáncer permanece limitado a la próstata pero pertenece a grupos de riesgo intermedio o alto, así como en aquellos tumores que han comenzado a invadir tejidos periprostáticos.

Además, puede indicarse después de la cirugía cuando el cáncer no fue extirpado por completo o cuando se produce una recurrencia local en la región prostática.

En los casos de enfermedad avanzada o metastásica (por ejemplo, con diseminación ósea), la radioterapia cumple un rol fundamental para controlar el crecimiento tumoral y aliviar síntomas, contribuyendo así a mejorar la calidad de vida del paciente mientras sea posible.

Principios de la Radioterapia en el Cáncer de Próstata

La radioterapia es uno de los tratamientos curativos más importantes para el cáncer de próstata localizado y localmente avanzado. Su efectividad se basa en principios físicos, biológicos y técnicos que permiten administrar dosis elevadas al tumor mientras se protege al máximo el tejido sano circundante. La radioterapia utiliza radiación ionizante, principalmente fotones de alta energía generados por aceleradores lineales, que producen daño en el ADN de las células tumorales tanto de manera directa, mediante roturas en las cadenas del ADN, como de manera indirecta, a través de radicales libres formados por la ionización del agua intracelular. El blanco terapéutico principal es el adenocarcinoma prostático, incluyendo en algunos casos los ganglios pélvicos cuando el riesgo oncológico es intermedio o alto.

La eficacia del tratamiento depende de administrar una dosis adecuada, medida en Gray (Gy), que logre el control tumoral sin sobrepasar la tolerancia de órganos cercanos como

el recto, la vejiga, las cabezas femorales y la uretra prostática. Existen distintos esquemas de tratamiento, que incluyen la radioterapia convencional (74–80 Gy en fracciones de 1.8–2 Gy), el hipofraccionamiento moderado (60 Gy en 20 fracciones) y el hipofraccionamiento extremo o SBRT (35–40 Gy en 5 fracciones). Para lograr una distribución precisa de la dosis se emplean técnicas avanzadas como IMRT, VMAT e IGRT, que permiten conformar la dosis al volumen tumoral y reducir la irradiación de los órganos de riesgo.

Desde el punto de vista radiobiológico, el cáncer de próstata posee un bajo coeficiente α/β , lo que indica que responde mejor a fracciones grandes de radiación. Esto sustenta el uso del hipofraccionamiento, ya que fracciones mayores producen un mayor efecto biológico sobre el tumor mientras que los tejidos sanos toleran relativamente bien este aumento. Por estas razones, las guías clínicas actuales recomiendan el hipofraccionamiento como un enfoque estándar en pacientes con enfermedad localizada.

La planificación de la radioterapia es un proceso estratégico que busca administrar la dosis óptima de radiación al tumor, minimizando simultáneamente la exposición a órganos sensibles como el recto, la vejiga y las vesículas seminales entre otros. Tradicionalmente, esta planificación se ha basado en la tomografía computarizada (TC), debido a su capacidad para proporcionar información anatómica tridimensional y datos necesarios para los cálculos de dosis.

Sin embargo, la TC presenta limitaciones importantes en la visualización de tejidos blandos, lo que puede llevar a imprecisiones considerables en la delimitación del volumen tumoral prostático (GTV) y del volumen objetivo clínico (CTV). Este desafío ha impulsado la incorporación de técnicas de imagen avanzadas que aportan mayor precisión y especificidad.

Proceso de Planificación

La TC tridimensional es aún la pieza central en el proceso de simulación para radioterapia porque proporciona una geometría reproducible del paciente y, fundamentalmente, los datos de densidad electrónica necesarios para calcular la distribución de dosis con precisión en los algoritmos de planificación dosimétrica (p. ej. cálculo de atenuación y transporte de fotones/partículas). Por eso la mayoría de los flujos clínicos mantienen una TC de simulación (planning-CT) como imagen base sobre la que se delinean volúmenes, se colocan marcadores de isocentro y se calculan dosis finales.

Tipos de radioterapia

Radioterapia 3D

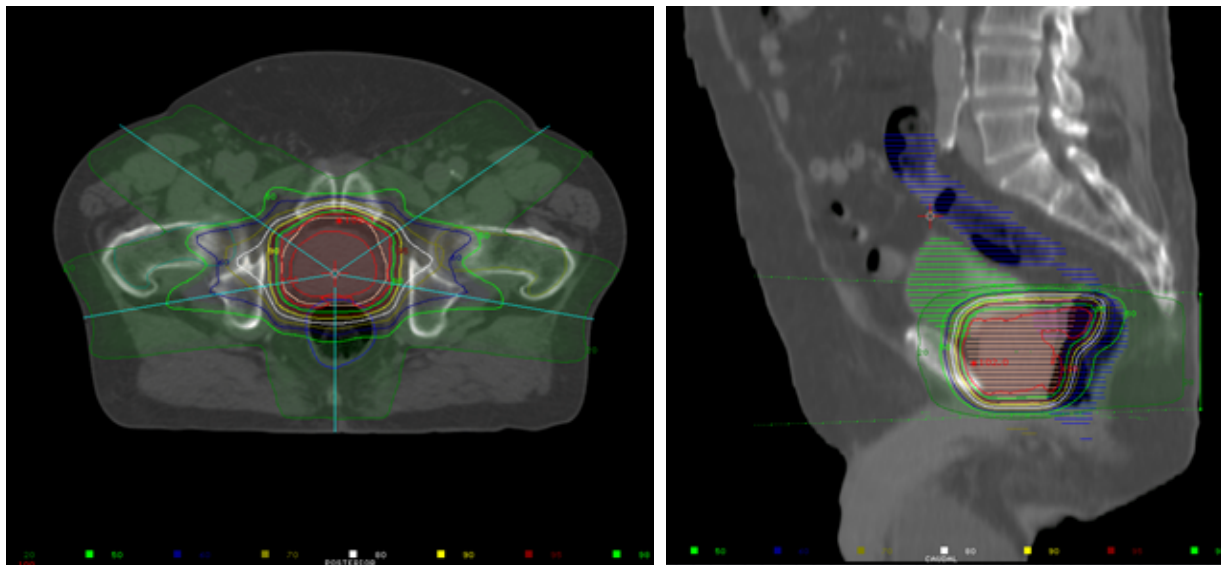
La radioterapia conformada tridimensional (3D-CRT) fue durante décadas la técnica estándar en el tratamiento del cáncer de próstata localizado. La radioterapia 3D-CRT con dosis escalonada produce resultados favorables en el cáncer de próstata localizado. Esta experiencia multiinstitucional permite la comparación con otras experiencias con radioterapia moderna así lo indica (Michalski & Winter, 2012). Con el desarrollo de nuevas tecnologías, la 3D-CRT dejó de ser considerada la técnica ideal para esta patología. Su principal limitación radica en la incapacidad de modular la intensidad del haz, lo que restringe la conformidad de la dosis alrededor de la próstata. En contraste, técnicas avanzadas como la radioterapia de intensidad modulada (IMRT) y la radioterapia volumétrica modulada en arco (VMAT) ofrecen distribuciones de dosis más precisas y permiten mejorar la protección de órganos de riesgo, disminuyendo la toxicidad gastrointestinal y genitourinaria.

Aunque la 3D-CRT sigue utilizándose en algunos contextos donde los recursos tecnológicos son limitados, su rol actual es secundario frente a técnicas más avanzadas que han demostrado mejor perfil de eficacia y seguridad. No obstante, su contribución histórica fue

fundamental para el desarrollo de la radioterapia moderna en tumores prostáticos y constituye la base tecnológica sobre la que se construyeron las técnicas contemporáneas. A continuación se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Planificación de próstata con técnica 3D (CAT-3D) en corte axial (izquierda) y sagital (derecha).



Radioterapia IMRT

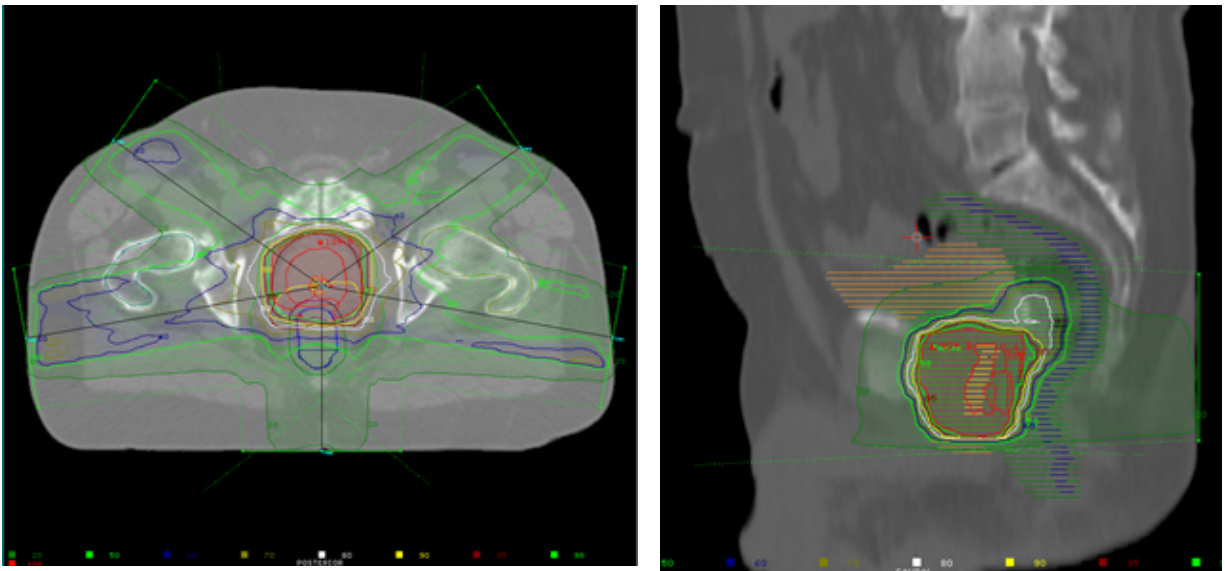
La radioterapia de intensidad modulada (IMRT) representa uno de los avances más significativos en el tratamiento del cáncer de próstata. A diferencia de la 3D-CRT, la IMRT permite modular la intensidad del haz de radiación en múltiples segmentos, logrando así una distribución de dosis altamente conformada alrededor de la próstata. Esta capacidad de variación fina en la intensidad posibilita administrar dosis más elevadas al tumor mientras se reduce la exposición a la vejiga, el recto y otras estructuras críticas.

Gracias a esta precisión, la IMRT se convirtió en la técnica recomendada en la mayoría de las guías clínicas internacionales, ya que se asocia a una disminución significativa de la toxicidad gastrointestinal y genitourinaria sin comprometer el control tumoral. Varios estudios, incluidos ensayos clínicos y metaanálisis, han demostrado que la IMRT permite lograr tasas de control bioquímico comparables o superiores a técnicas anteriores, especialmente en escenarios de escalada de dosis.

Además, la IMRT ha favorecido el desarrollo de esquemas hipofraccionados y moderadamente hipofraccionados, adaptándose al entendimiento radiobiológico actual del cáncer de próstata. Su precisión dosimétrica ha permitido integrar imágenes avanzadas (IGRT), mejorando aún más la exactitud del tratamiento. En este contexto observamos en la Figura 2 una planificación IMRT de próstata corte axial (izq) y sagital (derecha) donde se observan las curvas mucho más ajustadas al PTV.

Figura 2.

Planificación Próstata con técnica IMRT (Cat-3D) Izq: corte axial y Der: corte sagital



Radioterapia VMAT

La radioterapia volumétrica de arco modulado (VMAT) es una evolución de la IMRT que permite administrar la dosis mientras el acelerador lineal rota alrededor del paciente. Esta modalidad combina la modulación de intensidad con el movimiento continuo del gantry, lo que genera planes altamente conformados pero con una mayor eficiencia temporal.

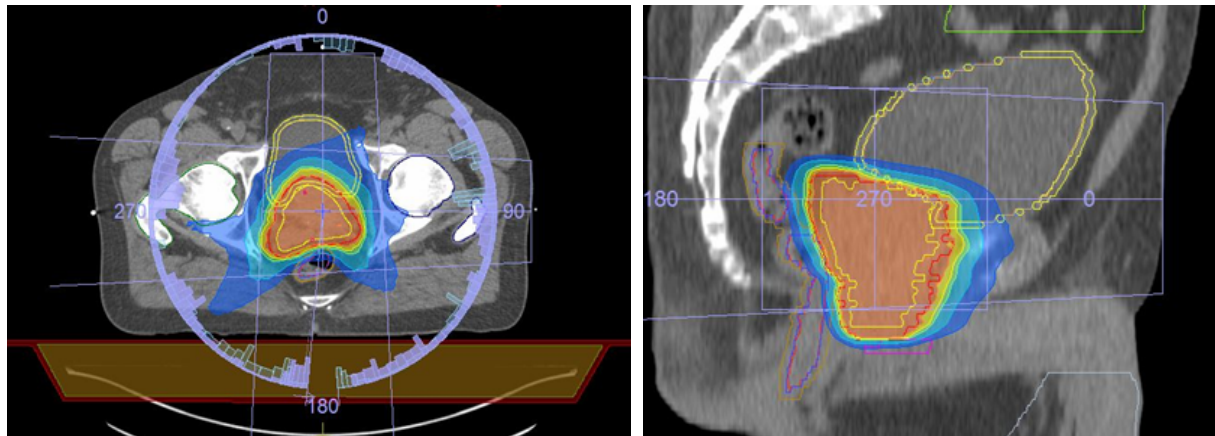
En comparación con IMRT, la VMAT suele ofrecer tiempos de tratamiento más cortos, menor cantidad de unidades monitor (MU) y una distribución de dosis igualmente precisa, e incluso superior en muchos parámetros dosimétricos. Esta reducción en el tiempo de irradiación contribuye a disminuir el movimiento del paciente y, por ende, mejora la reproducibilidad del tratamiento.

Incluso un estudio realizado por Samir & Meaz (2023) muestra una marcada mejora en la cobertura de dosis según el Volumen Objetivo de Planificación (PTV) en el VMAT-2A que en los otros planes. Al mismo tiempo, se encontró que los planes de VMAT-2A eran significativamente menores en cuanto a dosis para la vejiga y el recto que otras técnicas.

Las guías clínicas actuales incluyen tanto IMRT como VMAT dentro de las técnicas recomendadas, destacando que ambas cumplen con los estándares de calidad requeridos para el tratamiento del cáncer de próstata. En un estudio hecho por Quan & Wang (2012) se constató que para la misma cobertura PTV, los planes VMAT generados por AIP tenían una calidad significativamente mejor en términos de ahorro rectal que los planes clínicos de ocho haces y los planes IMRT. La superior calidad del plan VMAT resultó en aproximadamente un 30% más de unidades de monitorización que los planes IMRT de ocho haces, pero el tiempo de entrega seguía siendo inferior a 3 minutos. A continuación en la figura 3 una muestra de una planificación con la técnica Vmat.

Figura 3.

Planificación Próstata con técnica VMAT (Mónaco) Izq. corte axial y Der. corte sagital



Conceptos de Volúmenes en Radioterapia

El objetivo principal de los reportes de la ICRU es proporcionar un lenguaje común y sin ambigüedades para la planificación, prescripción y reporte de la dosis de radiación, permitiendo la comparación de resultados clínicos entre diferentes centros a nivel mundial. La transición del CTV (el objetivo biológico) al PTV (el volumen de planificación) es el paso más crucial, ya que incorpora todas las incertidumbres que afectan la entrega real de la dosis.

Volumen Macroscópico del Tumor (GTV)

Representa el volumen visible y palpable del tumor o enfermedad maligna que debe ser eliminada y se determina mediante la combinación de la exploración física y todas las modalidades de imagen disponibles (TC, RMN, PET, ecografía, etc.)

Volumen Clínico Objetivo (CTV)

Incluye el GTV más un margen de tejido circundante que se sospecha o se sabe que contiene enfermedad microscópica sub-clínica y debe recibir una dosis de tratamiento adecuada para garantizar el control tumoral, incluso si las células malignas no son detectables por imagen. El CTV es el volumen biológico real que necesita ser tratado.

Volumen de Planificación (PTV)

Es el CTV ampliado para tener en cuenta todas las incertidumbres geométricas y los movimientos durante el tratamiento. El Movimiento del Paciente/Órgano (IM) es la incerteza debida al movimiento del tumor y/o los órganos (ej. respiración, llenado de vejiga). El PTV es el volumen geométrico al que se le prescribe la dosis de radiación. Se asegura que el CTV reciba la dosis completa a pesar de las imprecisiones.

Órgano a Riesgo (OARS)

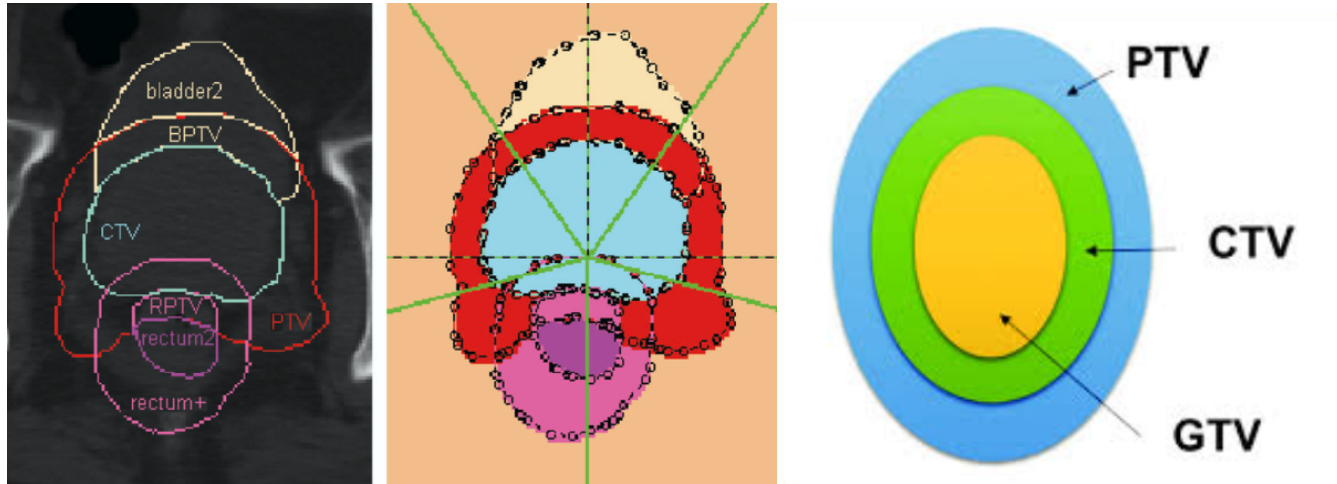
Tejido u órgano sensible cuya irradiación puede influir significativamente en la morbilidad o complicaciones graves post-tratamiento, por ejemplo, médula espinal, recto, vejiga, pulmones, cristalino, glándulas salivales. Se establecen límites de dosis (restricciones de dosis) para los OAR.

Volumen de Planificación del Órgano en Riesgo (PRV)

El OAR ampliado con un margen para tener en cuenta el movimiento o las incertidumbres de colocación del órgano. Al igual que el PTV, el PRV asegura que se tengan en cuenta las incertidumbres geométricas al evaluar el riesgo de irradiar un OAR.

Figura 4.

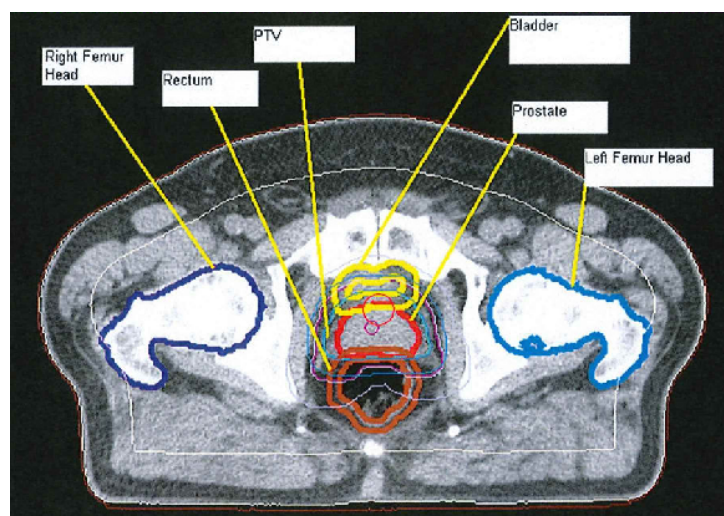
Contorneo Próstata con su CTV PTV y OARs (Izq) y las expansiones según ICRU (Der)



En la Figura 5 observamos una planificación de próstata con PTV y órganos de riesgo.

Figura 5.

Planificación próstata con PTV y OARs .



Nota. Adaptado de Radiobiological model in radiotherapy planning for prostate cancer, por Deb (2015) et al., s. f., Semantic Scholar.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Radiobiological-Model-in-Radiotherapy-Planning-for-Deb/45289a2fa7dad49f6e204aefe843acbc21b4ea88/figure/0>

Limitaciones de la TC

Si bien la tomografía computarizada (TC) ha sido durante años una herramienta central en la simulación y planificación de la radioterapia, su utilidad específica en el cáncer de próstata es limitada. En la práctica clínica actual, la TC no se emplea para el diagnóstico primario del tumor prostático debido a su bajo contraste de tejidos blandos, lo que impide diferenciar con precisión el adenocarcinoma prostático del tejido sano circundante. Su rol se reserva principalmente para la estadificación a distancia, especialmente en la búsqueda de metástasis óseas o ganglionares en pacientes con enfermedad avanzada.

Una de las principales limitaciones de la TC es que depende casi exclusivamente de criterios de tamaño para identificar ganglios linfáticos sospechosos. De manera convencional, se considera patológico un ganglio ≥ 1 cm en el eje corto; sin embargo, este criterio es poco sensible. En el cáncer de próstata, más de la mitad de los ganglios metastásicos pueden medir menos de 1 cm, por lo que pasan desapercibidos. Por otro lado, algunos ganglios aumentados pueden deberse a causas benignas, como hiperplasia reactiva, lo que reduce la especificidad del método.

Además, los estudios tomográficos carecen de información funcional o molecular, lo cual limita aún más su capacidad para detectar enfermedad microscópica o lesiones de bajo volumen. Por estas razones, en las últimas décadas se han desarrollado y adoptado técnicas más sensibles, como la PET/CT con radiotrazadores específicos (por ejemplo, PSMA), que

permiten una evaluación más precisa del tumor y de la diseminación ganglionar o metastásica. (Daryanani & Recent, 2021).

Imágenes multimodales claves para la planificación

La integración de modalidades de imagen complementarias denominada imagen multimodales han cobrado un papel fundamental en la oncología moderna. Su objetivo es fusionar información anatómica, funcional y metabólica para mejorar la caracterización del tumor y afinar la planificación terapéutica y en este contexto la RMmp y el PET-CT con PSMA han contribuido notablemente en la precisión del tratamiento del cancer de prostata.

En el cáncer de próstata, las dos técnicas más relevantes en este contexto son:

Resonancia Multiparamétrica y PET-CT con PSMA

Resonancia Magnética Multiparamétrica (RMmp)

Aunque los estudios iniciales de resonancia magnética (RM) para el de cáncer de próstata se realizaron a principios de la década de 1980 con un dispositivo magnetizado de 0,35 T, las aplicaciones clínicas se limitaron al ámbito experimental debido a los bajos valores del campo magnético y la deficiente calidad de imagen de las secuencias únicas. El interés clínico se renovó con el aumento de la calidad del imán, desde 0,3 T-0,5 T hasta 1,5 T e incluso hasta 3 T, con mejoras adicionales gracias a la técnica de bobina endorrectal (ERC) y la secuenciación. “Se puede resumir brevemente como un método para obtener una imagen tridimensional (3D)” ideal de la próstata mediante la combinación de imágenes ponderadas en T2 (T2WI), imágenes de difusión (DWI), imágenes con contraste dinámico (DCEI) y, si se desea, imágenes de espectroscopia por resonancia magnética (ERM). Si bien muchos centros han desarrollado su propio sistema de interpretación de RM utilizando algunas de estas secuencias, aún no existe una combinación estándar definida. Actualmente, en muchos centros, se utilizan fármacos que reducen la motilidad intestinal y una bobina endorrectal (ERC)

junto con el equipo de RM magnetizado de 1,5 T para prevenir artefactos de señal causados por el peristaltismo intestinal. Esta práctica ya es recomendada ampliamente por el Colegio Americano de Radiología (ACR) y la Sociedad Europea de Radiología Uroginecológica, así lo indica Demirel, H. C., & Davis, J. W. (2018) en su investigación llamada “Resonancia magnética multiparamétrica: Descripción general de la técnica, aplicaciones clínicas en la biopsia de próstata y perspectivas futuras”

Esta técnica ha revolucionado la detección del cáncer de próstata y la clasificación de riesgo. La indicación más clara de la RMmp en las guías clínicas es para pacientes con antecedentes de biopsia negativa/aumento del antígeno prostático específico (PSA) y la presencia de hallazgos adicionales que justifiquen su uso en pacientes sin biopsia previa y en vigilancia activa. La RMmp complementa la exploración clínica estándar, las mediciones de PSA y la biopsia sistemática, pero puede pasar por alto algunos tumores de tamaño insuficiente o con cambios en la densidad tisular.

Fundamentos Teóricos de RMmp

Campo Magnético

La resonancia magnética se basa en el comportamiento de ciertos núcleos atómicos, como el hidrógeno, cuando son sometidos a un campo magnético muy intenso. El campo magnético se mide en Tesla (1 Tesla equivale a 10.000 Gauss), y aunque el campo de la Tierra es muy débil, los equipos de resonancia generan campos miles de veces más fuertes. En condiciones normales, los protones del hidrógeno —que es muy abundante en el cuerpo humano por su alto contenido de agua— están orientados al azar y no producen un campo magnético neto. Cuando se aplica un campo magnético externo, estos protones tienden a alinearse con él y comienzan a girar describiendo un movimiento llamado precesión. La frecuencia de este giro se conoce como frecuencia de Larmor y depende directamente de la

intensidad del campo magnético aplicado. Si se envía al cuerpo una onda de radiofrecuencia con exactamente esa frecuencia, los protones absorben energía y pasan temporalmente a un estado excitado. Al cesar el pulso, los protones regresan a su posición original y liberan la energía absorbida en forma de señales de radio. Estas señales pueden ser detectadas por el equipo de resonancia magnética y procesadas para obtener imágenes detalladas del interior del cuerpo.

Generación de Imágenes

La obtención de imágenes por resonancia magnética se basa en detectar las ondas de radiofrecuencia emitidas por los protones del cuerpo después de haber sido estimulados por un pulso de RF dentro de un campo magnético. Cuando estos protones regresan a su estado de equilibrio, liberan energía con la misma frecuencia del pulso recibido. Esa energía es captada por antenas receptoras y procesada por un ordenador, que la transforma en imágenes. Para formar la imagen de una región específica del cuerpo es necesario saber de qué lugar proviene cada señal. Esto se logra añadiendo al campo magnético principal un segundo campo más débil y variable llamado gradiente. Este gradiente hace que la intensidad del campo magnético no sea igual en todas las partes del cuerpo, sino que cambie de manera controlada. Como la frecuencia de resonancia de los núcleos depende directamente de la intensidad del campo en el que se encuentran, cada zona del cuerpo tendrá una frecuencia diferente. Así, una frecuencia determinada se puede asociar a una posición concreta. Además, la intensidad de cada señal indica cuántos protones hay en ese punto, permitiendo estimar el volumen de tejido que corresponde a cada ubicación. Con toda esta información se construye un mapa de la distribución de protones, que se transforma en la imagen final. En la práctica, los equipos de resonancia magnética utilizan tres conjuntos de bobinas de gradiente para codificar la información espacial en las tres direcciones del espacio y así reconstruir imágenes detalladas del interior del cuerpo.

Secuencias

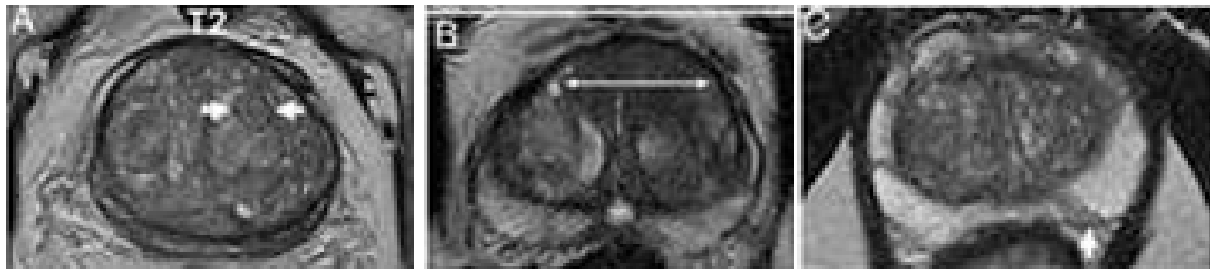
La resonancia magnética multiparamétrica (RMmp) de próstata combina diversas secuencias de imagen: ponderadas en T2 (T2WI), ponderadas en T1 sin contraste (T1WI), de difusión (DWI) y dinámica con contraste (DCE-MRI). Esta combinación permite una evaluación mucho más completa del tejido prostático, ya que cada secuencia aporta información diferente sobre la anatomía y la funcionalidad de la glándula. La RMmp ha demostrado ser significativamente más sensible para la detección del cáncer de próstata que cualquiera de las secuencias por separado. Por ejemplo, un estudio reportó sensibilidades individuales del 58% para T2WI, 53% para DWI y 38% para DCE-MRI, mientras que la RMmp alcanzó una sensibilidad del 85%. Asimismo, los valores predictivos positivo y negativo para la detección de cáncer de próstata mediante RMmp son considerablemente superiores a los que se obtienen usando cada secuencia de manera aislada.

Secuencia T2: la imagen ponderada en T2 ofrece un excelente contraste de tejidos blandos, alta resolución espacial y una buena relación señal/ruido, lo que permite una visualización detallada de la anatomía zonal de la próstata, las vesículas seminales y el haz neurovascular. Se recomienda adquirir imágenes ponderadas en T2 de alta resolución utilizando secuencias de eco de espín turbo o rápido en 2D, o eco de espín 3D, con una resolución en el plano de 0,4 a 0,7 mm y un grosor de corte de ≤ 3 mm. Estas imágenes se obtienen en los planos axial, sagital y coronal, mientras que las secuencias de difusión (DWI), T1 y dinámica con contraste (DCE-MRI) se adquieren generalmente en el mismo plano axial que las imágenes ponderadas en T2. El cáncer de próstata se identifica en las imágenes ponderadas en T2 como áreas de **hipointensidad** respecto al tejido prostático benigno. Además, los valores cuantitativos de T2 son significativamente menores en los tejidos malignos en comparación con el tejido sano, lo que permite diferenciar de manera más precisa el cáncer

de próstata. Un ejemplo característico de una imagen ponderada en T2 de próstata puede verse a continuación.

Figura 6.

Cortes axiales de próstata ponderados en T2.



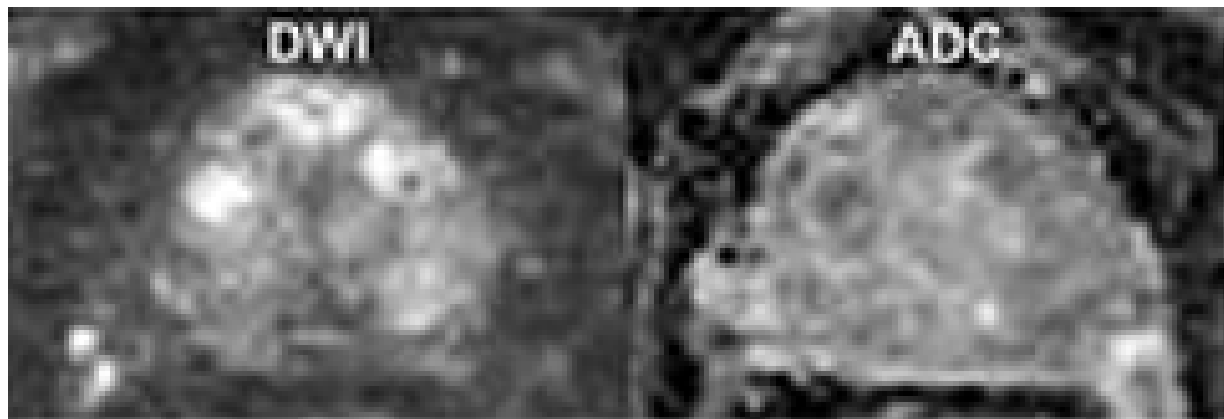
Nota. Adaptado de *Resonancia magnética de próstata: guía práctica de interpretación e informe según PI-RADS versión 2.1* por R. Sánchez-Oro et al., 2020, *Radiología*, 62(6), p 437-451 por *Radiología*. <https://doi.org/10.1016/j.rx.2020.09.001>

Secuencia DWI: La imagen por difusión es sensible al movimiento de las moléculas de agua y proporciona información sobre la estructura y densidad del tejido. En la práctica clínica, se emplea comúnmente una secuencia de eco de espín con imagen eco-planar, con una resolución planar superior a 2,5 mm y un grosor de corte de ≤ 4 mm. El ADC cuantifica la magnitud de la difusión molecular y es ampliamente utilizado en la práctica clínica para la detección del cáncer, siendo menor en tejido maligno que en tejido normal; además, existe una relación inversa entre el valor del ADC y el grado de Gleason del tumor. Un metaanálisis de 10 estudios mostró que la combinación de la resonancia magnética de difusión (RMD), específicamente el ADC, con imágenes ponderadas en T2, proporciona una mayor sensibilidad (76 %) y especificidad (82 %) para la detección de cáncer de próstata en comparación con las imágenes ponderadas en T2 por sí solas. Asimismo, se ha demostrado que los volúmenes tumorales estimados mediante RMD presentan una mejor correlación con el volumen

histológico que los obtenidos únicamente con imágenes ponderadas en T2 o con RMD con contraste. Un ejemplo representativo de una imagen por difusión con su correspondiente mapa ADC puede observarse en la Figura 7.

Figura 7.

Cortes axiales de próstata ponderados en DWI y ADC

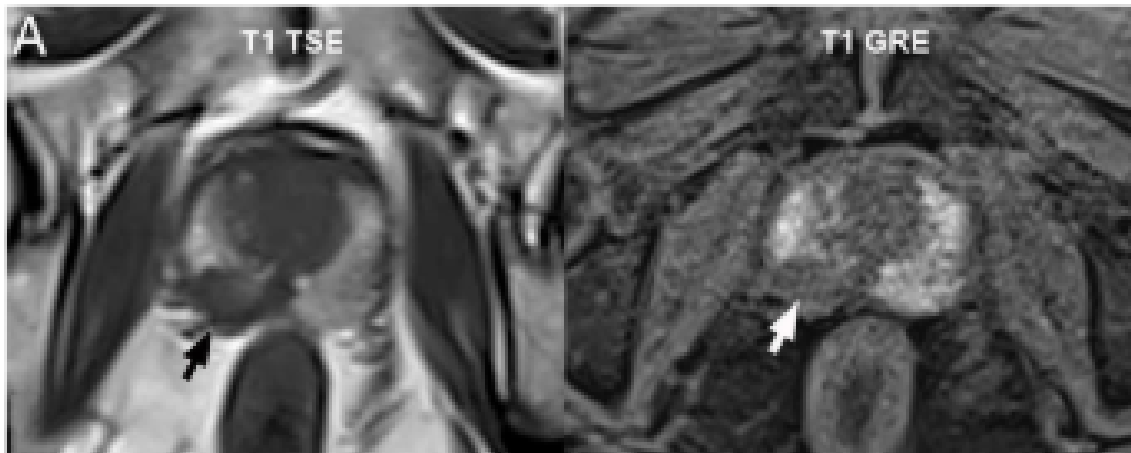


Nota. Adaptado de *Resonancia magnética de próstata: guía práctica de interpretación e informe según PI-RADS versión 2.1* por R. Sánchez-Oro et al., 2020, *Radiología*, 62(6), p 437-451 por *Radiología* <https://doi.org/10.1016/j.rx.2020.09.001>

Secuencias en T1: se adquieren imágenes ponderadas en T1 (T1W) antes de la administración de contraste, generalmente en un campo de visión amplio, utilizando secuencias de eco de espín o de gradiente, con o sin supresión de grasa. Estas imágenes permiten evaluar cambios recientes, como los derivados de una biopsia prostática. La presencia de áreas hiperintensas en T1 dentro de la próstata suele corresponder a hemorragia post biopsia. Un ejemplo característico de esta secuencia se observa en la Figura 8.

Figura 8.

Imagen de resonancia magnética multiparamétrica ponderada en T1.

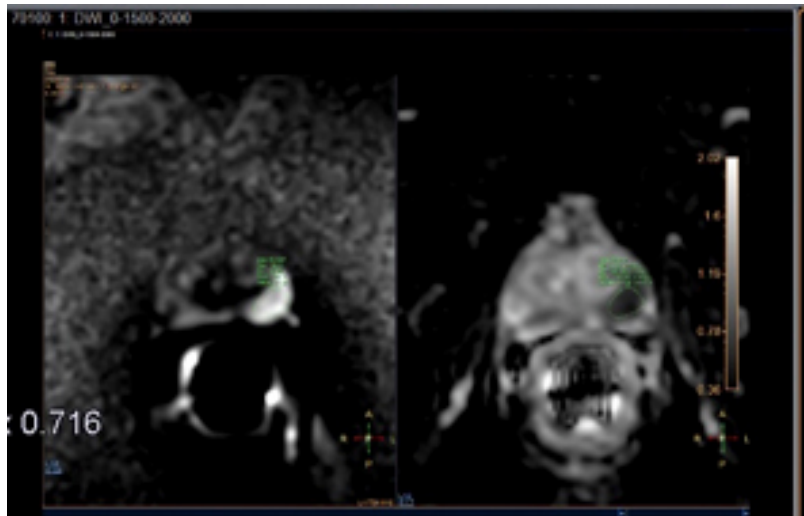


Nota. Adaptado de “Resonancia magnética de próstata: guía práctica de interpretación e informe según PI-RADS versión 2.1”, por Sánchez-Oro et al. (2020), **Radiología**, 62(6), 437–451. <https://doi.org/10.1016/j.rx.2020.09.001>.

Secuencia (DCE-MRI) dinámica con contraste, es una técnica de la resonancia magnética multiparamétrica que evalúa cómo se comporta el flujo sanguíneo dentro del tejido prostático luego de la administración de un contraste intravenoso. En el cáncer de próstata, esta secuencia permite identificar áreas que captan el contraste de forma rápida y presentan un lavado precoz, patrones típicos de los tumores debido a su mayor vascularización y permeabilidad capilar. Su utilidad radica en mejorar la detección de lesiones sospechosas, especialmente cuando la difusión no es concluyente, y en ayudar a definir con mayor precisión la extensión del tumor dentro de la glándula. Además, contribuye a orientar biopsias dirigidas y a optimizar la planificación de la radioterapia, ya que permite localizar con mayor exactitud los focos clínicamente significativos. Un ejemplo del realce temprano y el lavado rápido característicos puede observarse en la figura 9.

Figura 9

Imagen de resonancia magnética multiparamétrica ponderada en secuencia dinámica con contraste



Nota. Adaptado de “Cáncer de próstata, el problema del diagnóstico ¿Es la resonancia multiparamétrica de próstata la solución?”, por Guzmán F. P. y Messina A. (2019), *Revista chilena de radiología*, 25(2) <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-93082019000200060>

Tomografía por Emisión de Positrones (PET/CT)

Principio de Funcionamiento

De manera general, un escáner PET/TAC se compone de tres elementos: un escáner PET, un escáner TAC y una camilla para el paciente. La mayoría de los sistemas comerciales cuentan con un PET, que tiene sus detectores, electrónica y sistema de adquisición independiente de los módulos propios del TAC. El diseño de un PET/TAC ha venido influenciado por su aplicación en oncología, que necesita de dispositivos de gran apertura, con una gran sensibilidad y resolución espacial. Si el escáner se quiere usar además para planificación de RT, se necesita un calibre mayor de 70 cm (entre unos 80cm y 90cm) para

poder incluir los complementos necesarios para el posicionamiento del paciente en el acelerador. Actualmente, casi todas las casas comerciales ofrecen una versión del sistema PET/TAC para esta aplicación. Un elemento que ha tenido que ser rediseñado para el sistema combinado es la camilla, ya que tiene que reducirse al máximo la deflexión vertical que se produce debida al peso del paciente cuando atraviesa el gantry. Al estar los dos campos de visión separados, si no se corrigiera, las imágenes del PET y del TAC no estarían bien alineadas verticalmente, y por tanto quedarían mal registradas.

Bases físicas en PET-CT

En un PET, un fármaco marcado con un isótopo emisor de positrones se inyecta por vía venosa en el paciente, se distribuye por el cuerpo a través del torrente sanguíneo y entra en los órganos. En función del radiofármaco empleado se deja un tiempo de distribución entre la inyección y el estudio PET; para el caso de la FDG, este tiempo suele ser de unos 60min. Cuando el radioisótopo sufre una desintegración β^+ , se emite un positrón que viaja una distancia de hasta unos pocos milímetros antes de aniquilarse con un electrón de los materiales que forman los tejidos. En la aniquilación se generan un par de fotones que se mueven casi en direcciones opuestas. Los pares de fotones de aniquilación que salen del cuerpo humano y se detectan en coincidencia (coincidencias) por el escáner PET son la base de la imagen de esta modalidad. Los fotones de aniquilación son detectados por detectores que rodean al paciente dispuestos en forma de anillo.

Instrumentación: cristales centelleadores y tubos fotomultiplicadores

Los detectores PET consisten en cristales centelleadores acoplados con tubos fotomultiplicadores (PMT). Cuando el fotón de aniquilación interacciona en el cristal centelleador se produce el centelleo (haz de luz visible o próxima al visible) y este es convertido en señal eléctrica en un fotodetector (un material fotosensible convierte los fotones del

centelleo en electrones y estos son multiplicados y acelerados para formar el pulso eléctrico). Generalmente, el bloque de cristales centelleadores es leído por varios PMT, y la luz detectada es empleada en identificar el cristal en el que se ha producido la interacción. El cristal ideal se debería caracterizar por un alto poder para detener los fotones incidentes de 511 keV, por su capacidad para producir un corto y muy intenso haz de luz (fotofluorescencia), por medir de forma exacta la energía y tener un tiempo muerto corto. La capacidad para frenar los fotones viene determinada por el coeficiente de atenuación lineal (que es función de la densidad y del número atómico efectivo del material) y el espesor del cristal.

Trazadores Específicos para Próstata

Los trazadores específicos para próstata son radiofármacos utilizados en la Tomografía por Emisión de Positrones (PET), a menudo combinada con Tomografía Computarizada (TC) o Resonancia Magnética (RM), para obtener imágenes moleculares de alta precisión en el diagnóstico, estadificación y seguimiento del cáncer de próstata.

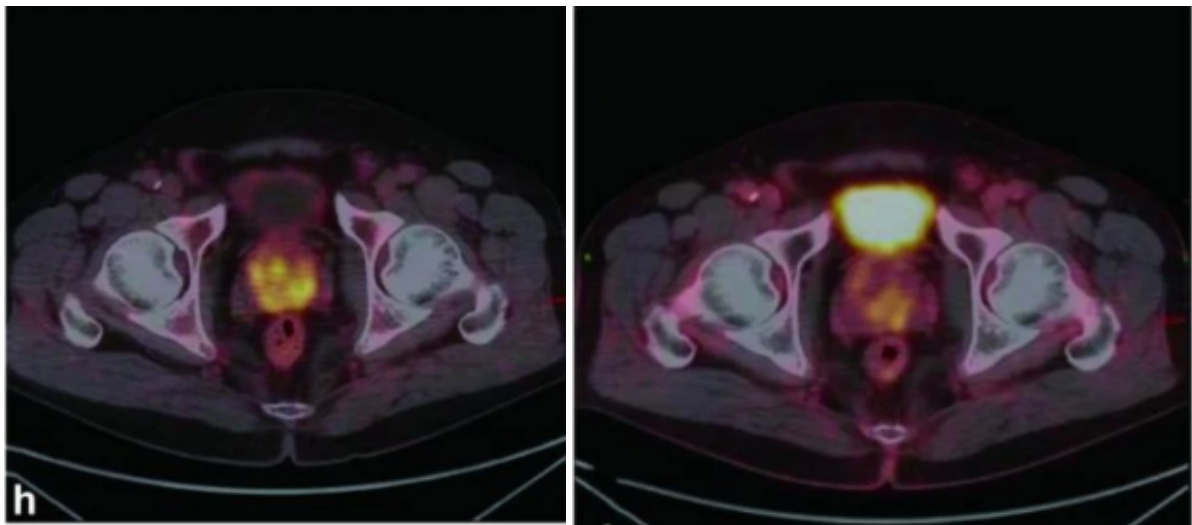
1) El Trazador PSMA: el Antígeno de Membrana Específico de Próstata (PSMA) es, actualmente, el biomarcador más relevante y con mayor utilidad clínica en el cáncer de próstata. Es una glicoproteína de membrana celular que se encuentra significativamente aumentada en la superficie de las células del cáncer de próstata, especialmente en las más agresivas y en la enfermedad metastásica.

La gran ventaja que tiene es su alta sensibilidad y especificidad y es significativamente más sensible que las imágenes convencionales (TC y gammagrafía ósea), especialmente para niveles bajos de PSA (Antígeno Prostático Específico) en casos de recidiva bioquímica y la detección precoz de recidivas/metástasis, permite identificar focos tumorales (incluyendo micrometástasis) en ganglios linfáticos, huesos y otros órganos en estadios muy tempranos. Un

ejemplo de la capacidad de esta técnica para detectar lesiones de pequeño volumen puede observarse en la Figura 10.

Figura 10.

Imagen de PET-CT con PSMA



Nota. Adaptado de “¿Qué criterios de interpretación de la PET-CT con PSMA permiten diagnosticar con mayor eficacia el cáncer de próstata?” *BMC Urology*, Springer Nature (2025)

Vol. 25 <https://doi.org/10.1186/s12880-025-01557-9>

2) El trazador de Colina es un radiofármaco que se utiliza en la Tomografía por Emisión de Positrones (PET) para obtener imágenes moleculares, principalmente en el diagnóstico y re-estadificación del cáncer de próstata. Es un componente esencial para la formación de las membranas celulares (fosfolípidos). Las células cancerosas, que se caracterizan por una rápida proliferación, requieren una mayor cantidad de colina para sintetizar nuevas membranas. A pesar de su eficacia demostrada, los trazadores basados en PSMA (Antígeno de Membrana Específico de Próstata) han demostrado ser significativamente más sensibles y específicos que la colina, especialmente a niveles muy bajos de PSA. Por esta

razón, en la práctica clínica moderna, el PSMA ha reemplazado en gran medida a la Colina como el trazador de elección para la mayoría de los escenarios en el cáncer de próstata.

Método

El presente trabajo se desarrolló bajo un enfoque descriptivo, narrativo y comparativo, orientado a analizar el impacto de las imágenes multimodales en la planificación de radioterapia para el tratamiento del cáncer de próstata. La metodología se basó en una revisión bibliográfica sistematizada de fuentes científicas recientes, complementada con un análisis comparativo de los avances tecnológicos y su aplicación clínica.

Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas internacionales como PubMed, SciELO y Google Académico, utilizando combinaciones de palabras clave tales como “cáncer de próstata”, “planificación de próstata”, “imágenes multimodales”, “PET/CT” y “multiparametric MRI”.

Se priorizaron artículos publicados entre 2015 y 2025, incluyendo revisiones sistemáticas, estudios comparativos, guías clínicas y reportes técnicos de instituciones especializadas en oncología radioterápica.

Posteriormente, se elaboró una descripción narrativa de los principales hallazgos, destacando las características técnicas y clínicas de las modalidades de imagen analizadas. El análisis comparativo abordó la contribución del PET/CT y la resonancia magnética multiparamétrica (RMmp) en la delimitación del volumen tumoral, la identificación de órganos de riesgo y la optimización de la planificación dosimétrica.

Este enfoque permitió identificar diferencias, ventajas y limitaciones de cada técnica en términos de precisión anatómica, información funcional y metabólica, así como su impacto en la eficacia del tratamiento y la reducción de toxicidad. Además, se consideraron aspectos prácticos relacionados con la implementación clínica, tales como disponibilidad tecnológica, costos y requerimientos de capacitación profesional.

Variable de Analisis

La precisión de la planificación de la radioterapia en el cáncer de próstata constituye el eje central del análisis, ya que permite evaluar el impacto de la fusión anatómica, funcional y metabólica de las imágenes multimodales en la precisión y eficacia del tratamiento radioterapéutico.

Variables Secundarias

1. Describir las técnicas de imagen, sus características y aportes en la planificación radioterapéutica del cáncer de próstata.
2. Explicar la precisión en la delimitación del volumen tumoral y la protección de los órganos a riesgo.
3. Identificar la optimización dosimétrica en la planificación radioterapéutica.

Fuentes de acceso

La población del estudio está constituida por la literatura científica y técnica publicada sobre la planificación de radioterapia en el cáncer de próstata, específicamente los estudios que evalúan la integración de imágenes multimodales como la tomografía por emisión de positrones combinada con tomografía computarizada (PET/CT) y la resonancia magnética multiparamétrica (RMmp).

Incluye artículos originales, revisiones bibliográficas y reportes técnicos publicados en revistas científicas indexadas en PubMed, SciELO y Google Académico, durante el período 2015–2025.

Resultados

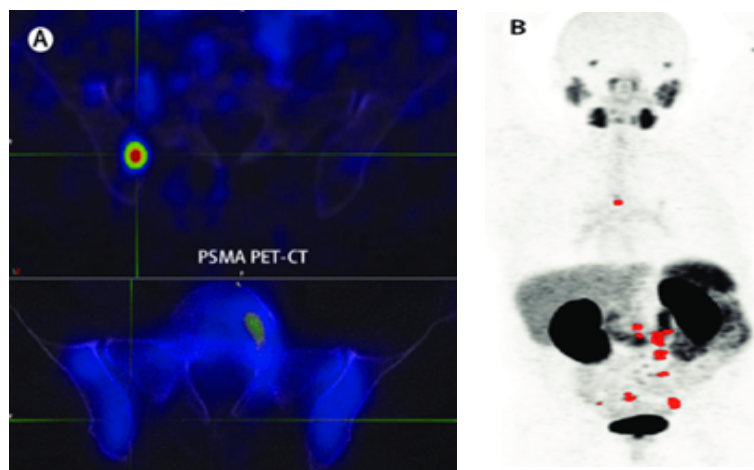
Técnicas de imagen utilizadas en la planificación de la radioterapia en el cáncer de próstata (PET-CT y RM)

La revisión de la literatura muestra que las técnicas de imagen más utilizadas —y actualmente consideradas esenciales— en la planificación radioterapéutica del cáncer de próstata son la tomografía por emisión de positrones combinada con tomografía computada (PET-CT), especialmente con trazadores dirigidos al antígeno de membrana específico de próstata (PSMA), y la resonancia magnética multiparamétrica (RMmp).

PET-CT con PSMA: Su papel central se debe a su alta sensibilidad y especificidad (Fig. 11) Estudios clave, como el de Hofman et al. (2020), reportan una sensibilidad media del 92% y una especificidad del 98% para la detección de metástasis ganglionares pélvicas, superando consistentemente a la TC y la RM convencionales. Su capacidad para identificar enfermedad localmente avanzada o recaída biológica permite una mayor precisión en la localización del volumen tumoral como lo indica la figura 11.

Figura 11.

Pet-CT con PSMA (A) Metástasis en hueso ilíaco Der. y (B) Múltiples Mts.ganglionares pélvicas.



Nota. Adaptado de “PET-TC con antígeno de membrana específico de próstata en pacientes con cáncer de próstata de alto riesgo antes de cirugía o radioterapia con intención curativa (proPSMA): un estudio prospectivo, aleatorizado y multicéntrico” Hofman, Michael S (2020)
THE LANCET

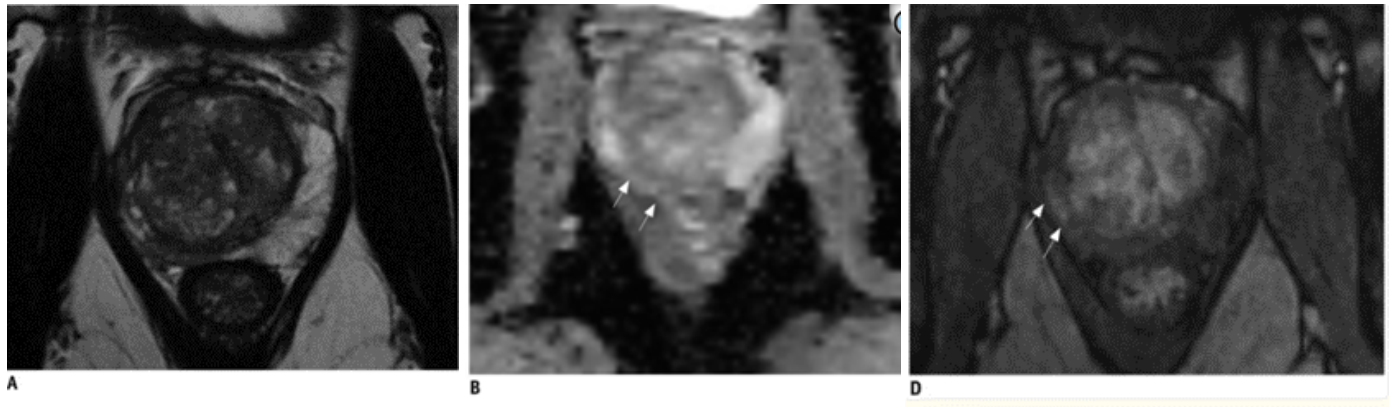
[https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(20\)30314-7/abstract](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(20)30314-7/abstract)

RMmp: Esta técnica, que integra secuencias T2 ponderadas, difusión (DWI/ADC) y dinámica con contraste (DCE) (Figura 12), se consolida como la herramienta más precisa para la caracterización anatómica. La resonancia magnética multiparamétrica (mpMRI) de próstata ha demostrado una alta capacidad para identificar cáncer clínicamente significativo. Las tasas de detección reportadas para enfermedad relevante oscilan entre el 44% y el 87% (Fütterer, 2017) superando claramente los resultados obtenidos mediante la biopsia transrectal ecoguiada tradicional, realizada de manera sistemática o “a ciegas”. Asimismo, la mpMRI se ha consolidado como la técnica de imagen de referencia para la detección, localización, estadificación, planificación terapéutica y seguimiento de los tumores prostáticos

En conjunto, la evidencia revisada demuestra que ambas modalidades aportan información complementaria: la PET-CT brinda datos funcionales y metabólicos, mientras que la RMmp aporta información anatómica detallada y estructural como la figura 12.

Figura 12.

Imágenes de resonancia magnética de próstata. RMmp de Próstata (A) ponderada en T2 (B) en su mapa de ADC y (D) ponderada en T1.



Nota. Adaptado de “Resonancia magnética multiparamétrica en la detección del cáncer de próstata clínicamente significativo” por Fütterer J. J. (2017) National Library of Medicine <https://doi.org/10.3348/kjr.2017.18.4.597>

Contribución de las técnicas de imagen a una mejor delimitación del volumen tumoral y órganos a riesgo

Los estudios muestran de manera consistente que la incorporación de PET-CT y RMmp en la planificación radioterapéutica permite una mejor delimitación del volumen tumoral (GTV) y de los órganos de riesgo (OAR) en comparación con métodos tradicionales como la TC sola.

Impacto en la Delimitación del GTV y CTV

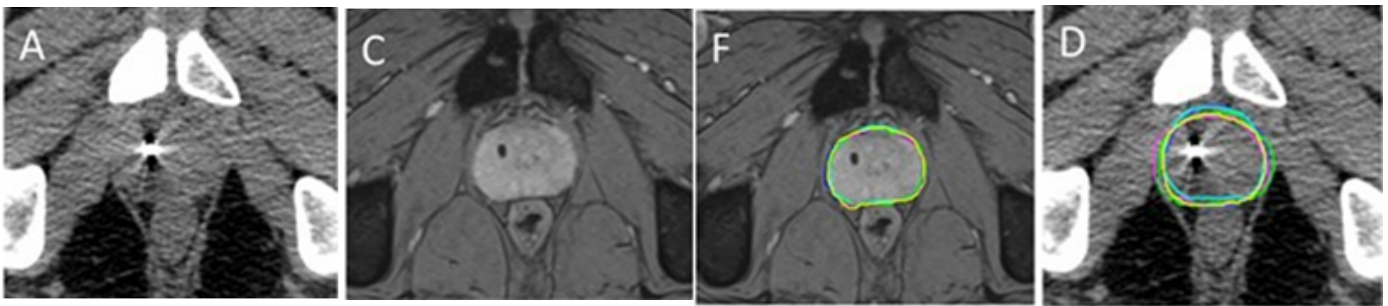
La RMmp, al identificar con precisión el tumor dominante intra-prostático, reduce la incertidumbre en los contornos (Figura 13). Muestran mucha menos variabilidad

interobservador y se delinean con mayor confianza y rapidez en la RMmp en comparación con la TC usando secuencias ponderadas en T2 (Pathmanathan & McNair, 2019).

La PET-CT con PSMA produce modificaciones significativas en el contorno del Volumen Clínico (CTV). Múltiples *papers* (por ejemplo, Zamboglou et al.) reportan que el PSMA-PET/CT lleva a modificaciones del CTV en el 18-30% de los pacientes con cáncer de riesgo intermedio o alto, lo que implica una redefinición del área de tratamiento, ya sea mediante la ampliación del campo para incluir enfermedad oculta o la reducción de márgenes innecesarios como lo vemos en la figura 13.

Figura 13

Imágenes de TC de Próstata (A y D) Rnmp en T2 (C y F) mostrando contorno de radioterapeuta y precisión de RMmp



Nota. Adaptado de “Comparación de la delimitación de la próstata en imágenes multimodales para radioterapia guiada por RM” por Angela U Pathmanathan (2019) British Institute of Radiology <https://doi.org/10.1259/bjr.20180948>

Impacto en la Delimitación de los OARs

Ambas modalidades permiten una visualización más clara de OARs como el recto, la vejiga y la uretra prostática. La RMmp, en particular, mejora la diferenciación anatómica, lo cual contribuye a delinear con mayor precisión estas estructuras. En síntesis, la evidencia muestra que estas técnicas reducen la incertidumbre geométrica y permiten un contorno más preciso, lo cual es fundamental para tratamientos avanzados como IMRT o VMAT.

Mejoras en la planificación dosimétrica gracias a la integración de imágenes avanzadas

Los resultados de la investigación teórica evidencian que la integración de PET-CT y RMmp en la planificación radioterapéutica conduce a mejoras sustanciales en la calidad dosimétrica de los planes de tratamiento. La mejora en la delimitación del GTV y de los OAR permite generar planes de radioterapia más ajustados y personalizados.

Los avances técnicos en la planificación y administración de la radioterapia (RT) han modificado de manera significativa los enfoques terapéuticos para el cáncer de próstata primario (CaP). Estas mejoras han permitido, por un lado, acortar la duración total del tratamiento y, por otro, administrar de forma segura dosis más elevadas de radiación. Numerosos estudios han demostrado la existencia de una relación dosis-respuesta en pacientes con CaP, especialmente en aquellos con características de alto riesgo, mostrando que el aumento progresivo de la dosis se asocia con un mejor control tumoral. De forma paralela al perfeccionamiento de las técnicas de RT, también han surgido métodos de imagen más avanzados, como la resonancia magnética multiparamétrica (mpMRI) y la tomografía por emisión de positrones dirigida al PSMA (PSMA-PET) (Zamboglou & Adebahr, 2021)

En conjunto, la integración multimodal contribuye a tratamientos más eficaces, seguros y personalizados, destacándose como una tendencia consolidada en la radioterapia moderna del cáncer de próstata.

Síntesis y Conclusiones

La presente investigación tuvo como propósito analizar el impacto de los avances en las imágenes médicas —particularmente la PET/CT con trazadores dirigidos al PSMA y la resonancia magnética multiparamétrica (RMmp)— en la precisión y eficacia de la planificación radioterapéutica en el cáncer de próstata. A partir de la revisión de la evidencia científica publicada entre 2015 y 2025, se sintetizan y discuten los hallazgos en función de los objetivos planteados, con el propósito de establecer conclusiones que permitan valorar la relevancia clínica de estas tecnologías y su potencial incorporación en la práctica asistencial.

Síntesis general del análisis realizado

La revisión realizada permitió constatar que la integración de imágenes avanzadas ha transformado de manera significativa el proceso de planificación radioterapéutica en el cáncer de próstata. Las limitaciones inherentes a la tomografía computada convencional —particularmente su escasa capacidad para diferenciar tejidos blandos— impulsaron la necesidad de incorporar modalidades capaces de ofrecer mayor precisión anatómica y funcional. En esta línea, tanto la PET/CT con PSMA como la RMmp han demostrado aportar información crítica para la identificación del volumen tumoral, la delimitación de lesiones intraprostáticas y la caracterización de órganos de riesgo.

Los estudios analizados coinciden en que la RMmp constituye una herramienta insustituible en la evaluación anatómica fina de la próstata, gracias al valor de sus secuencias T2, difusión (DWI/ADC) y dinámica con contraste (DCE). En paralelo, la PET/CT con PSMA emerge como el estándar de referencia para la detección de enfermedad localmente avanzada, recurrencia bioquímica y metástasis ganglionares pequeñas.

La convergencia de estas modalidades no solo mejora la exactitud del contorno, sino que repercute directamente en la calidad dosimétrica del tratamiento, al permitir planes más personalizados, precisos y seguros.

Síntesis según los objetivos específicos

Descripción de las técnicas de imagen utilizadas (PET/CT y RMmp)

El primer objetivo específico se centró en describir las técnicas de imagen actualmente utilizadas para la planificación de la radioterapia. Se comprobó que:

La PET/CT con PSMA ofrece una sensibilidad y especificidad significativamente superiores a las de la TC convencional para detectar lesiones primarias, ganglionares y a distancia.

La RMmp se consolida como la técnica más precisa para la evaluación anatómica intraprostática, permitiendo identificar lesiones clínicamente significativas y diferenciar con claridad la zona periférica y la zona de transición.

Ambas técnicas se encuentran ampliamente validadas en la literatura reciente y son consideradas hoy pilares de la planificación radioterapéutica avanzada, especialmente en pacientes seleccionados.

Contribución a la delimitación del volumen tumoral y órganos a riesgo

El segundo objetivo específico buscó comprender cómo estas técnicas contribuyen a mejorar la delimitación del volumen tumoral (GTV/CTV) y de los órganos en riesgo (OAR). La evidencia muestra que:

- La RMmp reduce la variabilidad interobservador, gracias a su alto contraste tisular.

- La PET/CT con PSMA modifica el CTV en un número significativo de pacientes, ampliándolo o reduciéndolo de acuerdo con la actividad metabólica real.

En conjunto, ambas tecnologías permiten obtener un GTV más preciso, reduciendo la incertidumbre geométrica y evitando tanto la subestimación como la sobreestimación del tumor. También se logra una delineación más clara del recto, vejiga, uretra y estructuras adyacentes, lo que reduce la irradiación innecesaria de estos órganos.

Estos hallazgos confirman que la integración de imágenes multimodales mejora notablemente la precisión del contorno y constituye un paso fundamental en la transición hacia una radioterapia personalizada.

Identificación de mejoras en la planificación dosimétrica

El tercer objetivo específico consistió en identificar las mejoras dosimétricas derivadas de la incorporación de estas técnicas. La literatura revisada indica que:

- La escalada de dosis focal (focal boost) basada en PSMA-PET permite incrementar la dosis al tumor dominante sin aumentar la toxicidad.
- La mejor delimitación del GTV y OAR posibilita planes más conformes, con menor dosis al recto y a la vejiga.
- La integración de PET/CT y RMmp permite reducir los márgenes del PTV, al disminuir la incertidumbre en la localización del tumor.
- Los planes elaborados con imágenes avanzadas presentan mayor homogeneidad y mejores gradientes de dosis, lo que aumenta la precisión y seguridad del tratamiento.

Por lo tanto, se concluye que la integración multimodal no sólo mejora la identificación anatómica y funcional, sino que tiene un impacto directo sobre los resultados dosimétricos y, potencialmente, clínicos.

Conclusiones generales de la investigación

A partir del análisis crítico de los estudios incluidos en la revisión, es posible establecer las siguientes conclusiones:

1. La planificación radioterapéutica basada exclusivamente en TC resulta insuficiente para garantizar la precisión requerida en el tratamiento moderno del cáncer de próstata. Su limitada capacidad para diferenciar estructuras de tejidos blandos justifica la necesaria incorporación de modalidades avanzadas.
2. La RMmp y la PET/CT con PSMA aportan información complementaria e indispensable:
 - a. La RMmp ofrece una descripción anatómica detallada.
 - b. La PET/CT identifica enfermedad metabólicamente activa y lesiones ocultas.
 - c. La combinación de ambas constituye una estrategia superior a la utilización aislada de una sola técnica.
3. La integración multimodal mejora de manera significativa la delimitación del volumen tumoral y de los órganos de riesgo, reduciendo la variabilidad interobservadora y aumentando la exactitud del proceso de planificación.
4. Se evidencian mejoras dosimétricas sustanciales, especialmente en términos de conformidad, homogeneidad y protección de órganos críticos. Estas mejoras posibilitan la implementación de estrategias como escalada de dosis focal sin incremento de toxicidad.
5. La personalización del tratamiento se ve fortalecida, permitiendo adaptar la dosis y el volumen según las características anatómicas y metabólicas reales de cada paciente.
6. A pesar de estos beneficios, la implementación de estas tecnologías presenta desafíos, principalmente asociados con:
 - disponibilidad de equipos,
 - costos de los trazadores PSMA,

- estandarización de protocolos de contorno,
- requerimientos de capacitación profesional.

Llegamos a la conclusión final que los avances en imágenes médicas han generado un impacto profundo en la planificación de la radioterapia del cáncer de próstata, ofreciendo mayor precisión, mejor personalización y potenciales mejoras en los resultados clínicos. La integración de PET/CT con PSMA y RMmp se posiciona como una herramienta indispensable en la radioterapia contemporánea, aunque su implementación requiere superar barreras logísticas, económicas y metodológicas. Este trabajo permite afirmar que la planificación guiada por imágenes multimodales representa el camino más prometedor hacia una radioterapia más segura, eficaz y adaptada a las necesidades clínicas de cada paciente.

Aportes y Contribuciones de la Investigación

La presente investigación constituye un aporte significativo al campo de la planificación radioterapéutica del cáncer de próstata, en un contexto donde la integración de imágenes avanzadas continúa desarrollándose pero aún no se encuentra completamente consolidada ni estandarizada en la práctica clínica. A partir de la revisión analítica y comparativa de la evidencia científica más relevante de la última década, este trabajo ofrece contribuciones que resultan valiosas tanto para el ámbito académico como para el entorno profesional.

Aportes conceptuales y teóricos

Uno de los principales aportes del trabajo radica en la sistematización y articulación conceptual de las técnicas de imagen más avanzadas empleadas en la planificación radioterapéutica: la PET/CT con trazadores PSMA y la resonancia magnética multiparamétrica (RMmp).

Si bien existe abundante literatura que describe estas técnicas por separado, son relativamente pocos los estudios que integran sus funciones, limitaciones, complementariedad y aplicación directa al proceso de planificación y contribuye a:

- *Unificar la información disponible y presentarla bajo un marco teórico claro, ordenado y actualizado.
- *Incorporar una síntesis comparativa entre las modalidades anatómicas, funcionales y metabólicas.
- *Explicar cómo esta integración se articula con los principios dosimétricos de la radioterapia moderna (IMRT, VMAT, focal boost, reducción de márgenes, etc.).

Aportes originales al análisis de la planificación radioterapéutica

El trabajo introduce tres aportes originales que enriquecen la discusión científica:

La integración multimodal como eje central de la precisión radioterapéutica

Se propone, de manera explícita, considerar la integración de PET/CT y RMmp no simplemente como tecnologías complementarias, sino como un nuevo estándar conceptual de planificación, capaz de redefinir la caracterización del tumor prostático.

Este planteamiento constituye un aporte interpretativo que ayuda a reformular la manera en que se entienden la anatomía, la biología tumoral y la dosimetría dentro del proceso de tratamiento.

Relación directa entre información metabólica-anatómica y calidad dosimétrica

La mayoría de los estudios evalúan por separado los beneficios anatómicos o dosimétricos. Este trabajo evidencia una relación causal clara:

Un mejor contorno conduce a una menor incertidumbre, lo que permite un ajuste de márgenes, que a su vez favorece una mayor conformidad y finalmente se traduce en una menor toxicidad.

Este encadenamiento lógico, fundamentado en los resultados revisados, representa una aportación original, porque no suele estar explicitado de manera integrada en la literatura general.

Aportes prácticos para la clínica y la toma de decisiones

El trabajo ofrece contribuciones relevantes para los servicios de radioterapia que buscan mejorar sus procesos de planificación:

- Presenta los beneficios concretos de incorporar imágenes avanzadas, basados en evidencia actualizada.
- Proporciona argumentos sólidos sobre la reducción de incertidumbres y la protección de órganos críticos.
- Expone el impacto de estas tecnologías en la disminución de la variabilidad.
- Genera una base conceptual que puede orientar la elaboración de protocolos de contorno más precisos y estandarizados.
- Facilita la toma de decisiones respecto a cuándo y en qué pacientes resulta más beneficiosa la integración multimodal.

Limitaciones de la Investigación

Si bien esta investigación se desarrolló como una revisión bibliográfica amplia y actualizada, presenta ciertas limitaciones inherentes a su naturaleza. En primer lugar, el análisis se centró exclusivamente en estudios publicados durante los últimos cinco años. Aunque este criterio permitió incorporar evidencia reciente y metodológicamente sólida, también implicó la exclusión de trabajos clásicos o investigaciones previas que podrían aportar una perspectiva histórica más amplia sobre la evolución de las técnicas de imagen en la planificación radioterapéutica del cáncer de próstata.

Finalmente, al no existir restricciones significativas en el acceso a la literatura ni limitaciones relacionadas con la pregunta problema, el alcance del trabajo dependió en gran medida de la disponibilidad de publicaciones en bases de datos académicas de amplia difusión. Esto puede generar un sesgo de publicación, dado que estudios no publicados o provenientes de ámbitos con menor visibilidad internacional podrían no haber sido considerados.

Líneas de Investigación Futuras

A partir del análisis realizado, surgen diversas líneas de investigación que podrían profundizar y complementar el conocimiento actual sobre el uso de técnicas de imagen avanzadas en la planificación radioterapéutica del cáncer de próstata. En primer lugar, sería pertinente desarrollar estudios comparativos que analicen de manera directa la eficacia dosimétrica de diferentes modalidades de imagen —como PSMA-PET/CT, PET con nuevos trazadores y resonancia multiparamétrica— aplicadas en distintos escenarios clínicos, incluyendo pacientes con enfermedad localizada, de riesgo intermedio y de alto riesgo. Este tipo de investigaciones permitiría establecer con mayor precisión qué técnica ofrece el mejor rendimiento en cada situación.

Asimismo, resulta relevante impulsar trabajos orientados a estandarizar los protocolos de adquisición, segmentación y fusión de imágenes. La variabilidad actual entre centros y equipos dificulta la comparación entre estudios, por lo que la creación de guías específicas podría mejorar la reproducibilidad y la aplicación clínica de estos métodos.

Otra línea de interés es la evaluación del impacto de las técnicas de imagen avanzadas en resultados clínicos a largo plazo, tales como control tumoral, supervivencia libre de recaída y reducción de la toxicidad. Aunque la literatura reciente muestra mejoras en la delimitación del volumen tumoral y los órganos de riesgo, aún son necesarios estudios que vinculen estas mejoras con beneficios concretos para el paciente.

Referencias

- Daryanani, A., & Recent, B. (2021, Diciembre 18). Avances recientes en la tomografía computarizada y la resonancia magnética del cáncer de próstata. 10.1053/j.semnuclmed.2021.11.013.
- Fütterer, J. (2017, Mayo 19). Resonancia magnética multiparamétrica en la detección del cáncer de próstata clínicamente significativo. 10.3348
- Gomis-Sellés, E., & Maldonado, A. (2025, Abril 17). Impacto de PSMA-PET/CT en las decisiones de radioterapia: ¿Existe algún beneficio clínico? 10.3390/cancers17081350
- Hofman, M., & Lawrentschuk, N. (2020, Abril 11). PET-TC con antígeno de membrana específico de próstata en pacientes con cáncer de próstata de alto riesgo antes de cirugía o radioterapia con intención curativa (proPSMA): un estudio prospectivo, aleatorizado y multicéntrico. *The Lancet*, 395. 10231, 1208-1216
- Huang, G., Albers, P., & Mookerji, N. (2025, Diciembre 27). Localización espacial tridimensional y estimación de volumen de tumores prostáticos usando 18F-PSMA-1007 PET/TC frente a resonancia magnética multiparamétrica.
- Karagiannis, V., & Saarinen, J. (2022, enero 29). Modificación del tratamiento de radioterapia para pacientes con cáncer de próstata basada en PSMA-PET/CT. *Radiat Oncol*. <https://doi.org/10.1186/s13014-022-01989-5>
- Keng Lim, N. (2021, Mayo 27). La etiología del cáncer de próstata. 10.36255/exonpublications.prostatecancer.etiology.2021
- Liu, L., & Zhu, L. (2023, Enero 4). Variabilidad de la delimitación de volumen de radioterapia: Volumen objetivo clínico basado en PSMA, PET/MRI y resonancia magnética, y volumen blanco de ganglios linfáticos para cáncer de próstata de alto riesgo. *Imagen del cáncer*. 10.1186/s40644-022-00518-7.

- Miao, C., & Yao, F. (2025, enero 28). Explorando el papel de los datos multimodales [F]F-PSMA-1007 PET/TC y resonancia magnética multiparamétrica en la predicción de la clasificación ISUP del cáncer de próstata primario. 10.1007/s00259-025-07099-0.
- Michalski, J., & Winter, K. (2012, Julio 1). Resultado clínico de pacientes tratados con radioterapia conformada 3D (3D-CRT) para cáncer de próstata en RTOG 9406. 10.1016/j.ijrobp.2011.12.070
- Otani, T., Nakamoto, R., & Umeoka, S. (2024, Septiembre 03). Imagen PSMA PET/TC y su aplicación en el tratamiento del cáncer de próstata. 10.1007/s11604-024-01646-9
- Pathmanathan, A. U., & McNair, H. A. (2019, Enero 11). Comparación de la delimitación de la próstata en imágenes multimodales para radioterapia guiada por RM. 10.1259/bjr.20180948
- Phillipi, M., & Choung, D. (2025, Noviembre 08). Rendimiento diagnóstico de PSMA PET/CT, resonancia magnética multiparamétrica e imagen combinada para recurrencia local del cáncer de próstata tras prostatectomía radical. 10.1007/s00261-025-05256-5
- Quan, E., & Wang, X. (2012, Julio 15). Una comparación exhaustiva de la calidad de los planes IMRT y VMAT para el tratamiento del cáncer de próstata. 10.1016/j.ijrobp.2011.09.015.
- Samir, F., & Meaz, T. (2023, agosto). Estudio dosimétrico analítico de radioterapia modulada en intensidad (IMRT) y terapia de arco modulado volumétrico (VMAT) para cáncer de próstata. 10.1007/s00432-023-04586-
- Sardaro, A., & Bardoscia, L. (2021, Enero 8). El papel de la resonancia magnética multiparamétrica en la radioterapia de arco modulado volumétrico para la recaída del cáncer de próstata tras prostatectomía radical: un estudio piloto. 10.3389/fonc.2020.603994.
- van Bergen, T., & Braat, A. (2025, SEPTIEMBRE 1). Integración de antígeno de membrana específico para próstata-PET y resonancia magnética multiparamétrica para la definición

macro del volumen tumoral en cáncer de próstata localizado y localmente avanzado tratado con radioterapia guiada por imagen. 10.1097/MOU.0000000000001321

Zamboglou, C., & Adebahr, S. (2021, Diciembre 18). Aumento de la dosis focal basado en PSMA-PET/MRI en pacientes con cáncer de próstata primario tratados con radioterapia corporal estereotáctica (hipofocal-SBRT): Protocolo de estudio de un ensayo de fase III aleatorizado y multicéntrico. 10.3390/cáncer13225795.

Zhang, Y., & Wang, S. (2022, Julio 22). Delineación macrovolumétrica tumoral en cáncer primario de próstata en 18F-PSMA-1007 PET/MRI y 68Ga-PSMA-11 PET/MRI.