



# Universidad **Mariana**

Análisis comparativo de la efectividad de las técnicas híbridas  
vs técnica VMAT en el tratamiento de cáncer de mama

Juan Felipe Burbano David  
Fausto Hugo Ordoñez Montánchez

Universidad Mariana  
Facultad Ciencias de la Salud  
Programa Tecnología en Radiodiagnóstico y Radioterapia  
San Juan de Pasto  
2024

Análisis comparativo de la efectividad de las técnicas híbridas  
vs técnica VMAT en el tratamiento de cáncer de mama

Juan Felipe Burbano David  
Fausto Hugo Ordoñez Montánchez

Informe de investigación para optar al título de  
Tecnólogo en Radiodiagnóstico y Radioterapia

Asesor  
Tec. David Rosero Mejía

Universidad Mariana  
Facultad Ciencias de la Salud  
Programa Tecnología en Radiodiagnóstico y Radioterapia  
San Juan de Pasto  
2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007  
Universidad Mariana

## **Agradecimientos**

Queremos manifestar nuestro más profundo agradecimiento a todos aquellos que facilitaron la ejecución de esta tesis. Primero, deseamos expresar nuestro agradecimiento a David Alejandro Rosero Tecnólogo en Radiodiagnóstico y Radioterapia, nuestro asesor de tesis, por su inestimable respaldo, guía y estímulo durante todo este proceso. Su experiencia y compromiso han jugado un papel importante en el progreso de este trabajo. Además, queremos expresar nuestro agradecimiento al personal del programa y a todos los profesores, cuyas lecciones han dejado un impacto indeleble en nuestra educación profesional. A nuestros familiares y amigos, por su respaldo sin reservas, su paciencia y por estar siempre a nuestro lado en las situaciones más adversas, su fe en nosotros ha sido un manantial constante de inspiración. Finalmente, no menos importante a Dios por guiarnos en la ejecución de este proyecto.

¡Gracias a todos ustedes!

## **Dedicatoria**

Dedicamos este trabajo a aquellos que han sido los pilares fundamentales en nuestro camino académico y personal. A nuestros padres, cuyo amor incondicional y constante apoyo han sido mi mayor fortaleza. A nuestros amigos, por compartir risas, desafíos y por ser una fuente inagotable de inspiración.

Agradecemos profundamente a nuestros profesores, cuya orientación y sabiduría nos han moldeado nuestro pensamiento y enriqueciendo cuyo aprendizaje. A cada persona que han formado parte de esta travesía, contribuyendo con su conocimiento, críticas constructivas y aliento, les debo parte de este logro.

Este trabajo también está dedicado a la perseverancia, la paciencia y la determinación que nos han acompañado en los momentos más desafiantes, cada obstáculo ha sido una oportunidad de crecimiento. Finalmente, dedicamos esta tesis a nosotros, como un recordatorio de la capacidad de superar obstáculos y alcanzar metas que este logro sea un impulso para futuros desafíos y un testimonio de que el esfuerzo y la dedicación siempre valen la pena.

## Contenido

Introducción .....	10
1. Resumen del proyecto.....	12
1.1. Descripción del problema .....	12
1.1.1. Formulación del problema .....	14
1.2. Justificación .....	14
1.3. Objetivos .....	16
1.3.1. Objetivo general.....	16
1.3.2. Objetivos específicos .....	16
1.3.3. Categorización de objetivos.....	17
1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos.....	18
1.4.1. Antecedentes .....	18
1.5. Marco teórico .....	31
1.5.1. Cáncer .....	31
1.5.2. Cáncer de mama.....	32
1.5.3. Clasificación del cáncer de mama.....	33
1.5.4. Incidencia y mortalidad.....	34
1.5.5. Radioterapia .....	34
1.5.6. Tratamiento de cáncer de mama .....	36
1.5.6.1. Tipos de tratamiento .....	37
1.5.6.1.1. Técnica Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT). .....	37
1.5.6.1.2. Técnicas híbridas .....	37
1.6. Metodología .....	38
1.6.1. Paradigma de investigación .....	38
1.6.2. Enfoque de investigación.....	38
1.6.3. Tipo de investigación.....	38
1.6.4. Técnicas e instrumentos de recolección de información .....	39
1.6.4.1. Técnicas. Revisión documental .....	39
1.6.4.2. Instrumentos de información. ....	40
1.6.5. Criterios de inclusión y exclusión.....	40

1.6.6. Elementos de datos .....	40
1.6.7. Plan de análisis de resultados.....	41
2. Presentación de resultados .....	42
2.1. Caracterización de los artículos .....	42
2.2. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas y Vmat.....	46
2.2.1. Terapia VMAT.....	46
2.2.2. Terapia híbrida H-VMAT .....	50
2.3. Cartilla educativa: comparación de técnicas híbridas vs técnica VMAT en el tratamiento del cáncer de mama.....	73
2.4. Discusión.....	74
3. Conclusiones .....	81
4. Recomendaciones .....	83
Referencias bibliográficas.....	84
Anexos .....	91

## Índice de tablas

Tabla 1. Matriz de revisión documental.....	39
Tabla 2. Distribución porcentual de la base de datos de búsqueda.....	42
Tabla 3. Distribución porcentual del país de los artículos incluidos.....	42
Tabla 4. Distribución porcentual del idioma de los artículos.....	43
Tabla 5. Distribución porcentual del año de publicación de los artículos.....	44
Tabla 6. Distribución porcentual de las terapias híbridas y VMAT.....	45
Tabla 7. Ventajas y desventajas de las terapias VMAT en cáncer de mama.....	46
Tabla 8. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas H-VMAT.....	50
Tabla 9. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: arcos clásicos (clVMAT), arcos tangenciales (tVMAT) y arcos divididos (spVMAT).....	53
Tabla 10. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas JO-VMAT, tVMAT.....	54
Tabla 11. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas H-IMRT.....	55
Tabla 12. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas VMAT+3DCRT.....	58
Tabla 13. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas H-IMRT H-VMAT.....	60
Tabla 14. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas IMRT – VMAT.....	63
Tabla 15. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas IMRT+3DCRT – IMRT+VMAT.....	64
Tabla 16. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas DFB-FiF (Field in Field de haz aplanado dinámicamente).....	65
Tabla 17. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: radioterapia híbrida de intensidad modulada (HYI) – Terapia híbrida de arco volumétrico modulado (HYV) y arco reducido VMAT (BT). .....	66
Tabla 18. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: 3DCRT+VMAT – IMR+VMAT – 3DCRT FIF.....	67
Tabla 19. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: intensity-modulated radiation therapy (fIMRT).....	68
Tabla 20. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: tIMRT - tVMAT.....	69
Tabla 21. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: VMAT combinado – terapia convencional de campo tangencial.....	70

Tabla 22. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: 3D-CRT/IMRT (radioterapia conformada tridimensional/intensidad modulada) ..... 71

## **Introducción**

El cáncer de mama representa uno de los problemas más relevantes de salud pública globalmente en el que impacta a la mayoría de mujeres anualmente, con 670,000 muertes asociadas y 2.3 millones de casos diagnosticados en 2022 a nivel mundial, según la OMS. Esta enfermedad no solo presenta retos en su tratamiento, sino también afecto la calidad de vida de los pacientes debido a las secuelas tanto físicas como emocionales que puedan experimentar. En Colombia según Cuenta de Alto Costo afirma que, en hasta agosto de 2023, se registraron 107,181 casos, con un aumento sostenido en la prevalencia desde 2015.

A pesar de los avances tecnológicos en la detección temprana del cáncer de mama, las mujeres se someten a una serie de tratamiento, de esta manera Delaney et al., en el 2017 afirma que, dentro las opciones terapéuticas la radioterapia es uno de los más utilizados para la reducir la recurrencia y mejorar la supervivencia. Es así como se hace referencia a la radioterapia híbrida en el que combina las técnicas tanto como la radioterapia conformal tridimensional (3D-CRT) y la radioterapia de intensidad modulada (IMRT) para mejorar la distribución de dosis y reducir efectos secundarios (Boyages et al., 2018; Misher, 2024), por otro lado, la arcoterapia volumétrica modulada (VMAT) mejoran la precisión del tratamiento y protegiendo órganos a riesgo (American Cancer Society, 2020), en vista de la importancia que radica estas terapias, se decide realizar esta investigación, debido a que existe una necesidad de comparar la efectividad de estas técnicas con la finalidad de aportar desde el conocimiento al campo de la radioterapia.

El desarrollo del estudio tiene como objetivo comparar la efectividad de las técnicas híbridas vs técnica VMAT en el tratamiento de cáncer de mama. Diversos estudios han comparado dichas técnicas anteriormente mencionadas, destacando las ventajas de cada una en términos de precisión, administración de dosis y protección de órganos a riesgo, como puede ser el corazón y los pulmones (Bonaccorsi, et al., 2024; Tatiane et al., 2024).

Por tal motivo, la presente investigación se basa en una revisión exhaustiva documental de artículos científicos disponibles en Google académico, Scielo, Lilac entre otras. Se emplearon palabras claves relevantes para identificar estudios y artículos relacionados en la técnica VMAT y

en las diferentes técnicas híbridas en el tratamiento de cáncer de mama lo cual se busca identificar las ventajas y desventajas de las técnicas con el fin de suministrar un análisis crítico que aportara al avance de conocimiento en el área de radioterapia. Igualmente, como parte del desarrollo se pretende diseñar una cartilla educativa relacionada con el tema en mención.

Este trabajo está dividido en tres partes, en la parte inicial se encuentra la descripción del problema, justificación y objetivos planteados. Enseguida, se da estructura al marco de referencias que son las bases teóricas y documental que dan soporte a la investigación, en cuanto a la metodología, encontramos un paradigma cualitativo, enfoque histórico hermenéutico y descriptiva, utilizando como técnica de recolección la revisión documental, por tal motivo se diseñó una matriz de revisión, en la cual se consignan aspectos relevantes como son nombre del artículo, autores, país, idioma, año en publicación, objetivo, método, resultado, conclusiones, tipo de técnica utilizada, ventajas y desventajas, se tomó un total de 30 artículos, que surgieron de la revisión de bases de datos relacionadas con la temática a investigar. En la parte final encontramos los resultados se presentan cada una de las técnicas híbridas y VMAT, enfocándose en las ventajas y desventajas, posterior a ello se realiza la interpretación de los hallazgos, la discusión y finalmente las conclusiones y recomendaciones.

## **1. Resumen del proyecto**

### **1.1. Descripción del problema**

El cáncer de mama se ha convertido en uno de los principales desafíos de salud pública, afectando significativamente la salud y el bienestar de las mujeres a nivel global. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), en 2022 se registraron 2,3 millones de nuevos casos de cáncer de mama en mujeres y 670.000 muertes a nivel mundial. En América Latina y el Caribe, esta enfermedad es la más frecuente y la segunda causa de mortalidad por cáncer en mujeres (OMS y OPS, 2022).

De acuerdo con GLOBOCAN, el cáncer de mama representó el 12% de todos los casos de cáncer diagnosticados en 2020, con 2.261.419 nuevos casos a nivel global, consolidándose como la principal causa de mortalidad por cáncer en mujeres. En Sudamérica, se reportaron 150.288 casos, con Brasil liderando las cifras (58,9%), seguido de Argentina (14,7%) y Colombia (10,3%). Además, la región registró 41.681 muertes, lo que refleja el alto impacto de esta enfermedad en términos de salud y mortalidad (Cuenta de Alto Costo, 2023).

En Colombia, la situación también es alarmante. En 2023 se reportaron 107.181 casos prevalentes de cáncer de mama en mujeres, con un aumento sostenido de la prevalencia entre 2015 y 2022. Durante 2022, los casos nuevos aumentaron un 18% en comparación con años anteriores, lo que podría atribuirse a una mejora en la detección temprana o a un incremento en los factores de riesgo. A pesar de este aumento en los diagnósticos, la mortalidad asociada a esta enfermedad sigue siendo del 10%, evidenciando el desafío que representa para la salud pública (Cuenta de Alto Costo, 2023).

En el tratamiento del cáncer de mama, la radioterapia se destaca como una modalidad clave. Según Vlasov (2024), esta estrategia terapéutica utiliza diferentes tipos de radiación ionizante, como rayos X, gamma, electrones de alta energía y partículas pesadas, para tratar tumores malignos y aliviar síntomas en casos paliativos. Se estima que aproximadamente el 50% de los pacientes con cáncer recurren a la radioterapia en algún momento de su tratamiento, ya sea como modalidad

principal o complementaria a otras como la cirugía, la quimioterapia o la inmunoterapia. Además, los avances tecnológicos han mejorado la precisión del tratamiento, reduciendo los efectos adversos en tejidos sanos y aumentando las tasas de éxito (American Cancer Society, 2020).

A pesar de estos avances, el creciente impacto del cáncer de mama y su alta incidencia subrayan la necesidad de optimizar las estrategias terapéuticas, incluyendo la radioterapia, para garantizar un manejo más eficaz y con menos efectos secundarios.

El cáncer de mama es una de las patologías más comunes tratadas mediante radioterapia, una modalidad clave para mejorar la cobertura del volumen objetivo. Sin embargo, persiste una preocupación significativa en torno a la exposición de órganos circundantes, como el corazón y los pulmones, a dosis de radiación no deseadas. Esta exposición aumenta el riesgo de efectos secundarios a largo plazo, especialmente en pacientes con anatomías complejas o en aquellos que requieren dosis altas o moderadas.

Ante este desafío, investigaciones recientes han explorado técnicas avanzadas de radioterapia para optimizar la precisión y reducir el daño colateral. Entre las más destacadas se encuentran las técnicas híbridas y la radioterapia de arco modulada volumétricamente (VMAT). Las técnicas híbridas combinan radioterapia conformal tridimensional (3D-CRT) y radioterapia de intensidad modulada (IMRT), integrando las ventajas de ambas para mejorar la cobertura del tumor y minimizar la irradiación a órganos en riesgo. Por su parte, VMAT utiliza la rotación constante del acelerador lineal, logrando una dosimetría precisa y protección de tejidos cercanos.

Estudios recientes, como los de Tatiane M. et al. (2024), han señalado que un enfoque híbrido compuesto por 80% de 3D-CRT y 20% de VMAT ofrece una cobertura excelente del volumen objetivo y reduce significativamente la dosis recibida por la mama contralateral. A su vez, investigaciones adicionales han evaluado otras técnicas avanzadas, como la terapia con protones de helio y la terapia de arco no isocéntrica (offVMAT), demostrando beneficios adicionales en la protección de órganos en riesgo y la adaptación a anatomías complejas.

Asimismo, existe un vacío de conocimiento respecto a la comparación directa entre las técnicas híbridas y VMAT en términos de efectividad, precisión y protección de órganos en riesgo en el

tratamiento del cáncer de mama. Este vacío resulta especialmente relevante dado que el tratamiento de esta enfermedad está en constante evolución.

En este contexto, resulta fundamental realizar un análisis comparativo de ambas técnicas, no solo para fortalecer la evidencia científica, sino también para proveer material educativo que permita a los estudiantes del Programa de Tecnología en Radiodiagnóstico y Radioterapia profundizar en su comprensión de estas estrategias avanzadas. La realización de este estudio contribuirá a optimizar los protocolos de tratamiento y garantizar una atención más segura y eficaz para las pacientes con cáncer de mama.

### ***1.1.1. Formulación del problema***

¿Cuál es la efectividad comparativa de las técnicas híbridas vs técnica VMAT en el tratamiento de cáncer de mama?

## **1.2. Justificación**

El cáncer de mama sigue siendo una de las principales causas de mortalidad entre las mujeres a nivel mundial, a pesar de los avances significativos en diagnóstico y tratamiento. La radioterapia, en particular, ha experimentado progresos importantes en su tecnología, mejorando tanto la reducción de la recurrencia local como la supervivencia a largo plazo en los pacientes (Delaney et al., 2017). Entre las técnicas avanzadas de radioterapia que han surgido en los últimos años, destacan las técnicas híbridas y la Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT), que buscan optimizar la precisión y efectividad de los tratamientos. Estas técnicas permiten una administración más precisa de la radiación, lo que disminuye la exposición innecesaria de tejidos sanos y mejora la dosificación en áreas específicas del tumor, aspectos fundamentales en el tratamiento del cáncer de mama.

Sin embargo, a pesar de los avances prometedores, aún existe una escasez de evidencia comparativa directa entre estas dos técnicas, lo que limita la capacidad de los profesionales para tomar decisiones fundamentadas sobre cuál de ellas ofrece mayores beneficios. La mayoría de los

estudios existentes han analizado estas técnicas por separado, enfocándose en sus beneficios individuales sin realizar una comparación directa que permita determinar cuál es más efectiva en términos de resultados clínicos, efectos secundarios y calidad de vida de los pacientes (Boda-Heggemann et al., 2015).

En este sentido, la investigación cobra relevancia al abordar la falta de evidencia comparativa entre las técnicas híbridas y la Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT) en el tratamiento del cáncer de mama. Al ofrecer un análisis más detallado y actualizado de ambas metodologías, se contribuye a llenar esta importante laguna en el conocimiento científico. Este estudio también tuvo influencia directa en la formación de los estudiantes del Programa de Tecnología en Radiodiagnóstico y Radioterapia de la Universidad Mariana en San Juan de Pasto, al finalizar con la creación de una cartilla educativa que servirá como herramienta didáctica para reforzar y ampliar sus conocimientos en esta área. Este recurso, además de servir como material de referencia para los estudiantes, fortalece su comprensión de las técnicas avanzadas en radioterapia, permitiéndoles aplicar sus conocimientos de manera más efectiva en la práctica clínica.

Por otro lado, el estudio tiene una gran relevancia a nivel regional, ya que la comparación de estas técnicas de radioterapia es un tema escasamente abordado en la literatura científica local, lo que hace que este trabajo sea una contribución única y novedosa para la formación de los estudiantes. Al proporcionar una revisión exhaustiva de la literatura, la investigación amplía el conocimiento teórico sobre las opciones terapéuticas para el tratamiento del cáncer de mama y facilitó la elaboración de una cartilla que sintetiza los aspectos más importantes de las técnicas comparadas, lo que proporciona una visión clara y accesible para los profesionales de la salud y estudiantes de radiodiagnóstico. Asimismo, esta investigación no solo amplía el conocimiento en un área clave del tratamiento oncológico, sino que también tiene un impacto positivo en la formación académica y profesional de los futuros tecnólogos en radiodiagnóstico y radioterapia.

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo general***

Comparar la efectividad de las técnicas híbridas vs técnica VMAT en el tratamiento de cáncer de mama.

#### ***1.3.2. Objetivos específicos***

Caracterizar los artículos científicos sobre las técnicas híbridas y técnica VMAT en el tratamiento del cáncer de mama.

Describir las ventajas y desventajas de las técnicas híbridas vs técnica VMAT en el tratamiento de cáncer de mama.

Diseñar una cartilla educativa respecto a los hallazgos relacionados con las técnicas híbridas vs técnica VMAT.

1.3.3. Categorización de objetivos

Objetivo	Categoría	Subcategoría	Preguntas orientadoras	Técnicas de recolección	Instrumentos de recolección	Fuente
Caracterizar los artículos científicos sobre las técnicas híbridas y técnica VMAT en el tratamiento del cáncer de mama.	Caracterización	Año de publicación	Número de artículos publicados en el año 2020 a 2024	Revisión bibliográfica	Matriz de vaciado de información	Base de datos
		Base de datos	Número de artículos de acuerdo a la base de datos			
		País	Número de artículos de acuerdo al país			
		Idioma	Idioma en que se publican			
Describir las ventajas y desventajas de las técnicas híbridas vs técnica VMAT en el tratamiento de cáncer de mama.	Comparación	Ventajas	¿Qué ventajas se obtienen de las técnicas híbridas vs técnica VMAT en el tratamiento de cáncer de mama?	Revisión bibliográfica	Matriz de vaciado de información	Base de datos
		Desventajas	¿Qué desventajas se obtienen de las técnicas híbridas vs técnica VMAT en el tratamiento de cáncer de mama?			
Diseñar una cartilla educativa respecto a los hallazgos relacionados con las técnicas híbridas vs técnica VMAT.	Cartilla	Definición cáncer de mama	¿Qué aspectos se resaltan en los hallazgos de la comparación de las terapias híbridas vs la técnica VMAT en tratamiento de cáncer de mama?	Resultados investigación	Diseño de cartilla	Hallazgos
		Técnicas radioterapéuticas				
		Efectividad				
		Resultados obtenidos				

## **1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos**

### ***1.4.1. Antecedentes***

Subhas et al. en el 2023, el objetivo del estudio fue comparar diferentes índices dosimétricos para el volumen objetivo (PTV) y los órganos en riesgo (OAR) al evaluar el uso de haces de fotones sin filtro aplanador (FFF) en la planificación híbrida del tratamiento de cáncer de mama. Un grupo de pacientes que recibieron radioterapia de 40 Gy en 15 fracciones fue incluido lo cual se crearon planes de radioterapia IMRT retrospectiva que combinaban un 60% de terapia de radiación conformada tridimensional (3DCRT) y un 40% de IMRT utilizando haces de fotones con y sin filtro. Los histogramas dosis-volumen se utilizaron para analizar los índices dosimétricos. Los resultados indicaron que el plan con haces FFF híbridos obtuvo una puntuación de índice de dosimetría (UDI), lo que indica una pequeña ventaja sobre el plan con haces FF. Ambos planes mostraron dosis comparables para el pulmón, y no se observaron diferencias significativas entre los dos métodos en cuanto a la dosis recibida por el corazón. Sin embargo, el plan con haces FFF híbridos tuvo un tiempo de exposición más corto. En conclusión, la planificación híbrida utilizando haces FFF ofrece una cobertura del volumen objetivo comparable, mejora la preservación de órganos en riesgo y reduce los tiempos de tratamiento, lo que indica su efectividad en el manejo en el cáncer de mama.

Cirilo et al. en el 2023 se realizó un estudio en el cual tenía como objetivo medir la contribución de un método híbrido mientras se mantuvo sus limitaciones. El autor incluye a 30 pacientes que recibieron irradiación profiláctica ganglionar por cáncer de mama entre 2021 y 2022, en el cual se utilizaron herramientas estadísticas no paramétricas para el análisis de datos no eran gaussianas. Los resultados demostraron que el método VMAT fue el más adecuado para los parámetros relacionados con el pulmón ipsilateral, mientras que la dosimetría 3DCRT fue buena para otros parámetros relacionados con el pulmón. Pero las diferencias entre los métodos en otros aspectos no fueron tan concluyentes, lo que indicaba que las distribuciones no eran de la misma población. Al comparar los resultados de tres grupos de pacientes (todos los pacientes, aquellos tratados en la mama derecha y aquellos tratados en la mama izquierda), concluyendo que los diferentes métodos de planificación eran efectivos.

Racka et al. en el 2023, El estudio analizó tres técnicas de irradiación en pacientes con cáncer de mama en el lado izquierdo: radioterapia conformada tridimensional (3D-CRT), radioterapia de intensidad modulada híbrida (h-IMRT) y terapia de arco volumétrico modulada híbrida (h-VMAT). Estas técnicas se compararon en términos de distribución de dosis en el volumen objetivo (PTV) y en órganos en riesgo (OAR), así como en términos de estimación del riesgo de cánceres secundarios inducidos por radiación asociados con las técnicas híbridas. Las técnicas híbridas utilizaron campos dinámicos y un 3D-CRT con una relación de dosis del 80%/20%. Se utilizaron los histogramas de dosis-volumen para evaluar las dosis en PTV y OAR, y se utilizó el modelo para estimar los riesgos relativos de cánceres secundarios. Obtuvieron como resultados que, en comparación con el 3D-CRT, las técnicas híbridas mejoraron la cobertura del PTV. La técnica h-VMAT fue la más conforme, y se destacó por su mayor conformidad. Sin embargo, h-IMRT aumentó significativamente el número de unidades de monitorización necesarias, mientras que h-VMAT aumentó la dosis en órganos contralaterales y el riesgo de cánceres secundarios. Por último, pero no menos importante, las técnicas híbridas ofrecen una mejor cobertura del objetivo y protección de los OAR en comparación con 3D-CRT. Sin embargo, h-VMAT tiene un mayor riesgo de cánceres secundarios que h-IMRT.

Wei et al. en el 2023, el estudio tuvo como objetivo evaluar los resultados clínicos preliminares y la toxicidad aguda de la radioterapia de intensidad modulada híbrida (h-IMRT) y de la técnica de arco volumétrico modulado (VMAT) con refuerzo integrado simultáneo (SIB) en pacientes con cáncer de mama en el lado izquierdo. Se llevó a cabo un análisis retrospectivo en 149 pacientes que recibieron radioterapia adicional, en el cual se evaluaron diversas toxicidades agudas y se analizaron indicadores clave, tales como la supervivencia libre de recurrencia local (LRFS), la supervivencia libre de metástasis a distancia (DMFS), la supervivencia libre de enfermedad (DFS) y la supervivencia global (OS). La mediana de edad de los pacientes fue de 52 años y la duración promedio del seguimiento fue de 43,4 meses. Según los hallazgos, el 86% de los pacientes tenían dermatitis aguda leve (grados 0-1), mientras que el 14% tenía dermatitis de grado 2. No se registraron casos de neumonitis, esofagitis o ataques cardíacos agudos. Las tasas a tres años para LRFS, DMFS, DFS y OS fueron muy altas, alcanzando el 95,1%, el 90,3% y el 97,9%, respectivamente. Se descubrió que la invasión linfovascular y un estadio N avanzado estaban

relacionados con resultados más malos. Se concluyó que, La técnica híbrida IMRT-VMAT para el cáncer de mama izquierdo es segura y factible, y tiene una baja toxicidad en la radioterapia postoperatoria.

Haldar et al. en el 2023, el artículo se enfocó en resolver los desafíos asociados con la irradiación de la pared torácica y los ganglios linfáticos. Para mejorar la cobertura y la uniformidad de la dosis, y al mismo tiempo reducir la exposición del corazón y el pulmón del lado afectado, se emplearon técnicas de radioterapia de intensidad modulada (IMRT) y de terapia de arco modulada volumétrica (VMAT). Se evaluó un enfoque de planificación híbrido en diez pacientes con cáncer de mama, utilizando tres métodos de planificación: FiF, IMRT e IMRT híbrido, con una dosis prescrita de 40 Gy en 15 fracciones. Para evaluar los resultados, se examinaron los histogramas de dosis-volumen (DVH). Los resultados indicaron que la dosis al 95% del volumen objetivo (D95%) con la técnica FiF fue de  $37,10 \pm 0,48$  Gy. En IMRT, aumentó a  $39,32 \pm 0,34$  Gy y en IMRT híbrido a  $38,39 \pm 0,29$  Gy. En comparación con FiF e IMRT híbrida, los planes IMRT demostraron una mayor homogeneidad. En resumen, los planes de tratamiento con IMRT híbrido ofrecieron una mejor cobertura de dosis y mayor protección para los órganos en riesgo en comparación con las técnicas FiF e IMRT. También requerían un menor número de unidades de monitorización y tiempos de tratamiento, así como un volumen de dosis reducido.

Sultan et al. 2023, la investigación tuvo como objetivo optimizar la administración de radioterapia en pacientes con cáncer de mama, buscando una distribución de dosis más uniforme y conservadora con los tejidos sanos circundantes mediante el uso de métodos de planificación híbrida. Se comparó las técnicas 3DCRT, IMRT, VMAT y combinaciones híbridas (3DCRT+IMRT, IMRT+VMAT) con una relación de dosis del 50% en 20 pacientes que recibieron radioterapia. Para evaluar la calidad de los planes, se analizaron la dosis en órganos críticos, el índice de homogeneidad (HI), el índice de conformidad (CI) y el número de unidades de monitorización. Los resultados mostraron que, tanto para la irradiación del seno derecho como del izquierdo, los planes IMRT+VMAT tuvieron índices de conformidad e homogeneidad superiores que los planes híbridos basados en IMRT. Además, se observó que con el método híbrido 3DCRT+IMRT, las dosis en órganos críticos se redujeron significativamente. Esto mejoró la calidad del plan al reducir las dosis en la mama contralateral, el volumen irradiado de la mama y

las dosis al corazón. Se encontró que la combinación de IMRT+3DCRT es una opción viable para reducir las dosis en órganos vitales.

Saraç et al. en el 2023, el estudio evaluó planes de radioterapia híbrida aplicando técnicas de campo en campo tridimensional (FIF), radioterapia de intensidad modulada (IMRT) y arcoterapia volumétrica modulada (VMAT) en pacientes que recibieron radioterapia completa de mama tras una cirugía conservadora. Se administró una dosis total de 50 Gy a 31 pacientes, dividida en 25 fracciones. De esta manera realizaron comparaciones entre cinco tipos diferentes de planes de tratamiento: FIF, VMAT, IMRT, H-VMAT y H-IMRT. La homogeneidad del volumen de tratamiento planificado (PTV), las dosis en órganos periféricos críticos y los valores de unidades monitoras se evaluaron. Con lo anterior los autores mostraron que, en comparación con las técnicas tradicionales, ambos planes híbridos lograron una mayor homogeneidad en el volumen objetivo, con índices de homogeneidad (HI) entre 0,12 y 0,16 y menores valores de D2% (52,41-53,8 Gy), con una significancia estadística. Con las técnicas híbridas, la dosis media al corazón para irradiaciones en el lado izquierdo fue significativamente menor (3,40-3,54 Gy). Además, en comparación con otras técnicas, la técnica FIF redujo significativamente el valor D10% para la arteria descendente izquierda (LAD). En conclusión, en comparación con otras estrategias individuales, los planes híbridos redujeron las dosis en los pulmones y el corazón y distribuyeron las dosis de manera más homogénea.

Yipeng et al. en el 2023, El estudio concluyó que, en el tratamiento del cáncer de mama, el uso de arcoterapia volumétrica modulada (VMAT) con bolos de diferentes espesores puede mejorar la cobertura superficial del objetivo en la radioterapia post-mastectomía (PMRT). Los autores incluyen a 10 pacientes con cáncer de mama en el lado izquierdo recibieron radioterapia con VMAT con bolos de 5 mm (VMAT-5B) y 10 mm (VMAT-10B). Se simuló errores de configuración interfractionales introduciendo un desplazamiento de 3 mm al isocentro de los planes originales en tres direcciones: anteroposterior, izquierda-derecha e inferior-superior, esto se hizo para evaluar la robustez del tratamiento. Se recopiló histogramas de volumen de dosis (DVH) para evaluación y se recalculó los planes perturbados sin alterar otros parámetros. Los hallazgos indicaron que la técnica VMAT-5B protegió mejor los órganos en riesgo (OAR), mientras que la técnica VMAT-10B cubrió mejor el objetivo. Las fluctuaciones de dosis en el

volumen objetivo clínico (CTV) y los OAR fueron causadas por errores de configuración de 3mm. Las diferencias CTV en VMAT-5B fueron mínimas, con una diferencia máxima de -1,05 Gy en desplazamientos posteriores. Por otro lado, los desplazamientos en VMAT-10B tuvieron un impacto negativo en la cobertura de CTV. Las diferencias en las dosis D95% y D98% fueron -1,69 Gy, -1,48 Gy y -1,99 Gy, y se observó que los desplazamientos aumentaron las dosis al pulmón izquierdo y al corazón. En conclusión, Yipeng determinó que, el VMAT-5B conserva mejor los OAR y tiene una cobertura del objetivo aceptable porque es más resistente a errores de configuración de 3 mm que el VMAT-10B. Para la PMRT del cáncer de mama en el lado izquierdo, se recomienda utilizar un bolo de 5 mm con la técnica VMAT.

Salim et al. en el 2023, el estudio tuvo como objetivo evaluar y comparar la dosimetría de tres técnicas de radioterapia (3D-CRT, IMRT y VMAT) para identificar la opción más eficaz en el tratamiento del cáncer de mama con irradiación bilateral sincrónica. Para lograrlo, se examinó un grupo de 9 pacientes para evaluar la distribución de dosis en el sistema cardíaco, el miocardio, los pulmones y las arterias coronarias. Los resultados mostraron que la técnica de arcoterapia modulado volumétrico fue la más conservadora, con dosis más altas al sistema de conducción cardíaca al usar radioterapia de intensidad modulada, aunque estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. Además, la terapia tridimensional provocó efectos secundarios significativos en el miocardio y los pulmones. En conclusión, la técnica VMAT se mostró como la más eficaz para preservar órganos en riesgo, mostrando menos dosis en el miocardio, la arteria descendente anterior izquierda y los pulmones en comparación con la terapia tridimensional, que podría aumentar el riesgo de complicaciones cardiovasculares.

Marrazzo et al. en el 2023, el objetivo fue evaluar un algoritmo de optimización de planificación multicriterio a priori (mCycle) para la radioterapia de cáncer de mama localmente avanzado. El estudio comparó planes generados automáticamente con terapia de arco modulado volumétrico (AP-VMAT) y planes clínicos manuales de tomoterapia helicoidal (HT). Veinticinco pacientes recibieron radioterapia después de la operación y terapia hormonal. Los autores encontraron como resultados que los parámetros dosimétricos y los tiempos de administración y planificación. El volumen objetivo de planificación (PTV) se generó mediante una expansión isotrópica de 5 mm sobre el volumen clínico (CTV), dejando un margen de 5 mm respecto a la piel. Según la

verificación dosimétrica de los planes AP-VMAT, la dosis media a los órganos en riesgo, excepto el corazón y el pulmón ipsilateral, mejoró significativamente. Los planes AP-VMAT lograron una mayor cobertura de PTV del ganglio mamario interno, a pesar de que no hubo diferencias significativas en el volumen recibido del 95 % (V 95 %). Sin diferencias en los PTV del ganglio mamario interno y el refuerzo, los planes de HT presentaron valores más bajos de V 105% para los PTV de mama y ganglios. La tomoterapia helicoidal tardó en promedio diecisiete minutos, mientras que AP-VMAT solo tardó tres minutos. La tasa de aprobación promedio para los planes AP-VMAT fue del 97 %. En resumen, los planes AP-VMAT tuvieron una calidad similar o mejorada en comparación con los planes de HT, y la implementación de mCycle mostró una automatización eficiente del proceso de planificación, lo que disminuyó de manera significativa la carga de trabajo en el tratamiento del cáncer de mama localmente avanzado.

Yi et al. 2022, este estudio desarrolló un método híbrido efectivo y práctico para la irradiación de toda la mama con aceleradores lineales Halcyon. Para lograrlo, emplearon una técnica de cinco pasos: disposición del campo, creación y evaluación del volumen objetivo de planificación (PTV), creación de un plan básico, optimización del plan mediante radioterapia modulada por intensidad y, finalmente, evaluación e irradiación. Esto requiere una tomografía computarizada de haz cónico integrado. Los autores descubrieron cómo el método funcionó en diez pacientes que padecían cáncer de mama en una etapa temprana que al compararlo con un método basado en campos aplanados dinámicos (DFB-FiF). Ambos métodos tuvieron dosis y cobertura similares, pero el método sugerido tuvo una mayor homogeneidad. Además, el nuevo método aceleró el tiempo de irradiación aproximadamente cinco veces, aunque el tiempo de planificación y la complejidad fueron similares. En conclusión, este método híbrido reduce significativamente el tiempo de irradiación con resultados de dosis similares al método DFB-FiF.

Sushma et al. en el 2022, utilizando un fantoma de Alderson Rando, el estudio evaluó tanto el objetivo de tratamiento como el riesgo para los órganos adyacentes (OAR) con el fin de medir la dosis en la planificación de la radioterapia para el cáncer de mama izquierdo. Se analizaron cuatro métodos de tratamiento: radioterapia conformada tridimensional (3DCRT), radioterapia de intensidad modulada (IMRT), terapia de arco volumétrico modulado (VMAT) y una técnica híbrida que combinaba 3DCRT y VMAT, empleando energías de fotones de 6 MV en modos de haz fijo

(FF) y haz filtrado (FFF). Dosímetros de luminiscencia óptica (OSLD) y películas EBT3 se utilizaron para medir las dosis. Basado en modelos de exceso de riesgo absoluto (EAR), se analizó el riesgo a lo largo de la vida (LAR) de desarrollar cáncer secundario mediante simulaciones de exposiciones a la edad de treinta años. Las mediciones revelaron discrepancias aceptables con respecto al sistema de planificación de tratamiento (TPS). Los planes VMAT\_FFF mostraron los valores más altos de LAR ( $2,92 \pm 0,14$ ) en el pulmón izquierdo. En conclusión, tanto los OSLD como las películas EBT3 fueron adecuados para medir dosis, con el hecho de que los OSLD mostraron mejores resultados a distancias más largas. Se recomienda incluir la estimación de dosis in vivo en la auditoría de calidad del tratamiento para pacientes jóvenes debido al riesgo de cáncer secundario.

Lamprecht et al. en el 2022, el objetivo fue comparar los diferentes métodos de planificación de radioterapia craneal total (WBRT) para determinar cuáles ofrecen la mejor y la menor dosis para los órganos en riesgo (OAR). Los autores realizaron un análisis retrospectivo de 30 pacientes, que se dividieron equitativamente entre casos de mamas izquierdas y derechas. Se evaluaron para cada paciente las siguientes técnicas: radioterapia conformada tridimensional (3DCRT), radioterapia híbrida de intensidad modulada (HYI), terapia híbrida de arco volumétrico modulada (HYV), arco volumétrico modulado de haz reducido (BT) y radioterapia sin filtro aplanador (BTFFF). Los hallazgos indicaron que BTFFF registró las dosis medias más bajas al corazón para los pacientes con mamas izquierdas, mientras que la técnica BT logró el mayor índice de cumplimiento (IC) y la menor dosis media al corazón. Además, BTFFF resultó en las dosis pulmonares más bajas de todas las mediciones. Aunque las técnicas BT y BTFFF aumentaron las dosis en el pulmón y la mama contralaterales, estas dosis permanecieron dentro de los límites aceptables según la literatura. Por último, pero no menos importante, las técnicas BT y BTFFF brindaron las dosis más bajas a los OAR con una cobertura PTV similar.

Bi et al. en el 2022, se evaluó el impacto clínico de la radioterapia de intensidad modulada completa (IMRT), la IMRT híbrida (H-IMRT) y la arcoterapia volumétrica modulada híbrida (H-VMAT) en pacientes con cáncer de mama en etapa temprana, considerando la calidad del plan de tratamiento y el riesgo de desarrollar un segundo cáncer (SCR). Los autores crearon tres planes de tratamiento para 20 pacientes utilizando las técnicas utilizadas. Los planes se compararon en

términos de calidad del objetivo, preservación de órganos en riesgo (OAR) y SCR. Por lo tanto, obtuvieron los resultados y dijeron que el H-IMRT tenía mejor calidad que el IMRT, mientras que el H-VMAT tenía peores resultados. Varios índices de riesgo y dosis aumentaron significativamente, incluido el D 2% de SIB y EAR al pulmón contralateral y al esófago. Por otro lado, la IMRT completa redujo la dosis al corazón y el riesgo a la mama y los pulmones contralaterales. Bi S. et al., descubrieron que la H-IMRT ofrece la mejor calidad y preservación de OAR en la radioterapia SIB para cáncer de mama derecho temprano, siendo la opción más efectiva, mientras tanto la H-VMAT tuvo el peor desempeño en reducir la mortalidad.

Balaji y Ramasubramanian, en el 2022 compararon la dosimetría de cuatro planes de radioterapia híbridos para el tratamiento de cáncer de mama bilateral (SBBC) con un régimen de dosis hipofraccionada. Incluyeron tomografías computarizadas en 15 pacientes con SBBC utilizando cuatro técnicas híbridas: DCRT+IMRT, 3DCRT+VMAT, IMRT+VMAT y VMAT+IMRT. Los autores descubrieron que todos los planes estaban basados en una dosis hipofraccionada de 40,5 Gy en 15 fracciones, según lo mencionado anteriormente. Los parámetros dosimétricos de PTV y OAR se evaluaron. Los planes 3DCRT+VMAT e 3DCRT+IMRT demostraron un desempeño superior en PTV. El plan 3DCRT+IMRT mejoró OAR, mientras que IMRT+VMAT y VMAT+IMRT mejoraron las dosis bajas para el corazón y los pulmones. Se concluye que, la combinación 3DCRT+VMAT requería menos unidades de seguimiento y tiempo de tratamiento, según la puntuación de calidad que integra los parámetros dosimétricos de PTV y OAR, se afirma que el plan híbrido 3DCRT+VMAT es el más efectivo para el tratamiento de SBBC.

Ugurlu et al. en el 2022, dos investigadores llevaron a cabo un estudio sobre los efectos dosimétricos del uso de bolos volumétricos (VB) en el tratamiento del cáncer de mama izquierdo avanzado, comparando los datos del sistema de planificación del tratamiento con las mediciones dosimétricas realizadas en un maniquí Rando. El análisis se realizó en dos etapas para evaluar la viabilidad de utilizar VB, primero comparamos los planes de tratamiento en términos de dosis máxima puntual, IC y HI para las dosis de PTV y OAR para 15 pacientes con cáncer de mama avanzado del lado izquierdo que respiraban libremente. En segundo lugar, se tomaron mediciones en un maniquí humano similar utilizando dosímetros termoluminiscentes, se llevó a cabo un estudio

para confirmar la precisión de los planes de tratamiento generados con bolos volumétricos (VB) en el sistema de planificación, utilizando como referencia a 15 pacientes con cáncer de mama avanzado en el lado izquierdo. El estudio encontró que el uso de bolos virtuales para la planificación del tratamiento VMAT es un método efectivo para prevenir la falta de cobertura de objetivos. Se encontró que la calidad del plan no cambió cuando se utilizó un bolo virtual de 0,5 cm en la irradiación de mama completa realizada con la técnica VMAT; cuando se utilizó un bolo virtual de 1 cm o más, la calidad del plan cambió, y la calidad del plan disminuyó a medida que aumentaba el espesor del bolo virtual. Cuando se utilizaban bolos virtuales, los datos de TPS eran confiables, según los resultados de la medición con un dosímetro termoluminiscente.

Venjakob et al. 2021, se determinó que la terapia de arco volumétrico modulado híbrido (H-VMAT) era la mejor técnica para la radioterapia hipofraccionada del cáncer de mama. Para este estudio, los autores incluyeron 520 planes de tratamiento para 40 pacientes que recibieron tomografías en inspiración profunda. Se examinó un plan 3D-CRT como referencia y se compararon seis planes H-VMAT. Los filtros de cuña dura (HWF) y las energías de haz de H-VMAT se ajustaron, las energías mixtas y el uso/omisión de HWF se incluyeron en el plan de referencia. Según los resultados se concluye que en comparación con 3D-CRT, todos los planes H-VMAT mejoraron la cobertura, conformidad y homogeneidad de la dosis en el PTV. Además, varias combinaciones de H-VMAT mejoraron significativamente la protección de OAR ( $p < 0,05$ ), ya en el uso de HWF aumentó el tiempo de emisión y la cobertura de dosis. Las energías de haz más bajas (6 MV) demostraron ventajas en la planificación y la protección de OAR. Venjakob et al. descubrieron que H-VMAT produce distribuciones de dosis homogéneas y conformes, ofreciendo mejor protección a OAR dependiendo de la combinación seleccionada.

Santos et al. 2021, se investigó si la terapia de protones y la radioterapia híbrida de intensidad modulada (h-IMRT) incrementan el riesgo de desarrollar cáncer secundario en pacientes con cáncer de mama. Para comparar ambas técnicas, los autores utilizaron planes de tratamiento simulados en 15 pacientes. Usando los modelos BEIR VII y Schneider, se evaluó el riesgo de por vida (LAR) para los pulmones y la mama contralateral mediante histogramas de dosis-volumen (DVH). En todos los órganos estudiados, se encontró que la terapia de protones (IMPT) presentaba un riesgo menor de cáncer secundario en comparación con la h-IMRT, con el pulmón ipsilateral siendo el

más afectado. El modelo BEIR VII dio estimaciones de riesgo más altas que el modelo de Schneider. En conclusión, la terapia de protones reduce el riesgo de carcinogénesis secundaria, lo que la hace una opción prometedora para el tratamiento a largo plazo del cáncer de mama.

De la Llana et al. en el 2021 evaluaron las mejoras en la ubicación del isocentro de tratamiento para la radioterapia híbrida para el cáncer de mama en el centro de masa (CdM). Los autores utilizaron dos ubicaciones de isocentro para planificar el tratamiento para 22 pacientes. Una ubicación tuvo dos radioterapias de intensidad modulada hacia delante (fIMRT) tangenciales a la mama y otra ubicación tuvo una terapia de arco modulada volumétrica (VMAT) al refuerzo, utilizando una técnica de refuerzo simultánea. Se realizó una evaluación del vector de refuerzo de mama (BB) para determinar el isocentro apropiado. Se utilizó un análisis de varianza para analizar las métricas de los planes de refuerzo, mama e híbridos. Los resultados anteriores indicaron que no hubo diferencias significativas entre los planes híbridos centrados en el CdM del refuerzo y centrados en el CdM de la mama. Sin embargo, cuando se utilizó el isocentro en el CdM del refuerzo, se observó una mejora en la cobertura del volumen objetivo de planificación (PTV), especialmente en pacientes con un vector BB superior al 5%. Las dos estrategias tuvieron dosis similares en órganos de riesgo. De la Llana et al. descubrieron que la técnica híbrida fIMRT-VMAT centrada en el CdM del refuerzo es equivalente a la centrada en el CdM de la mama, pero mejora la cobertura del refuerzo del PTV en pacientes con un vector BB elevado.

Balaji y Ramasubramanian, en el 2021, se evaluó la planificación de radioterapia en pacientes con cáncer de mama localmente avanzado. Las cinco técnicas utilizadas para la comparación fueron: campo en campo (FinF), radioterapia de intensidad modulada (IMRT), arcoterapia modulada volumétrica (VMAT), IMRT híbrida (H-IMRT) y VMAT híbrida (H-VMAT). Según los resultados de este estudio, se administró una dosis de 40.5 Gy en 15 fracciones a los volúmenes objetivo (PTV). La puntuación integrada, que se calculó utilizando los índices dosimétricos de PTV y OAR, demostró que un valor cercano a cero indicaba un plan superior. Los hallazgos indican que H-IMRT y H-VMAT fueron los métodos más efectivos. Concluyeron que esta herramienta facilita la selección de planes basados en métricas cuantitativas y clínicos.

Qiu et al. 2021, el objetivo del estudio fue desarrollar una nueva tecnología interna llamada "VMAT no uniforme (NU-VMAT)" que puede reducir automáticamente la dosis cardíaca y

optimizar el tratamiento para el cáncer de mama izquierda haciendo uso de la radioterapia. Se utilizó un modelo NU-VMAT basado en el índice de coeficiente de movimiento de la MLC del gantry (IGM) para optimizar el movimiento de la MLC y la intensidad de modulación en ángulos particulares del gantry. El sistema de planificación de tratamiento (TPS) y el programa de optimización se conectaron a través de los archivos DICOM RT pertinentes utilizando el ESAPI integrado en Eclipse. Se incluye 14 pacientes recibieron radioterapia adicional de toda la mama con tecnología NU-VMAT y se comparó con técnicas VMAT e IMRT. Los parámetros dosimétricos, incluido el D1%, el D99%, la media del PTV y los volúmenes de pulmón y corazón expuestos a diferentes dosis se evaluaron. Las curvas IGM de NU-VMAT convergieron significativamente mejor que las de VMAT, según los resultados todas las técnicas cumplieron con las dosis requeridas para los tejidos objetivo y normales, pero NU-VMAT logró la dosis media más baja ( $5,38 \pm 0,46$  Gy) frente a IMRT ( $5,63 \pm 0,61$  Gy) y VMAT ( $7,95 \pm 0,52$  Gy). Además, se observaron diferencias significativas en el tiempo de administración y las unidades de monitoreo (MU); NU-VMAT experimentó una disminución del tiempo de administración del 28,4% y las unidades de monitoreo del 69,8% en comparación con IMRT. Los planes NU-VMAT demostraron una alta tasa de aprobación gamma ( $96,5\% \pm 1,11$ ) en la verificación de dosis plana y una diferencia mínima de dosis ( $2,4\% \pm 0,19$ ) en la verificación de dosis puntual. En resumen, NU-VMAT ayudó a optimizar el tratamiento del cáncer de mama izquierda al reducir las dosis cardíacas y ser más eficiente en la administración que el VMAT y la IMRT convencionales.

Rossi et al. en el 2021 consideraron que las deformaciones de tejidos blandos en dos sistemas de planificación del tratamiento (TPS), el estudio examinó las dosis cercanas a la superficie y la cobertura del objetivo en la radioterapia de arco modulado para cáncer de mama o la pared torácica. Un análisis retrospectivo con 10 pacientes que incluían ganglios linfáticos axilares fue realizado. Cada paciente recibió cinco planes diferentes de radioterapia: (1) técnica de campo en campo conformal tridimensional (FinF); (2) arcos de cuarenta grados con un bolo de optimización en Eclipse (EB); (3) arcos de doscientos cuarenta y tres a doscientos cincuenta grados con un bolo de 8mm en Mónaco (MB); (4) arcos de doscientos cuarenta y tres a doscientos cincuenta grados con una herramienta automática de flash de piel en Mónaco (MA); y (5) arcos de  $243^\circ$  a  $250^\circ$  con ASF y OB en Mónaco (MAB). Se editaron imágenes de tomografía computarizada con hinchazón de 4, 8 y 12 milímetros para simular deformaciones en tejidos blandos. En los planes FinF, la cobertura

del volumen objetivo clínico (V95%) disminuyó del noventa y seis al noventa por ciento. En los planes EB, la cobertura de la terapia de arco modulada volumétrica (VMAT) disminuyó del noventa y nueve al noventa y dos por ciento, mientras que en los planes MA, MB y MAB disminuyó significativamente. Dependiendo del plan, la dosis superficial media disminuyó en promedio entre 5 y 20 %. En los planes de Mónaco, el uso de un bolo de optimización junto con ASF mejoró la cobertura del objetivo y redujo las dosis máximas en comparación con el uso de ASF solo. Se destacó que el bolo de ocho milímetros con planes VMAT es fuerte para deformaciones de hasta ocho milímetros y se recomendó utilizar un bolo de optimización en planes de arco modulado. Se recomienda evaluar la necesidad de re planificación si la deformación es mayor.

Semaya et al. en el 2020 evaluaron y compararon los parámetros dosimétricos entre diversas técnicas de radioterapia, como 3DCRT, 3DFIF, IMRT MF5, tIMRT, tVMAT, Ecomp y planes híbridos, en pacientes tratadas con radioterapia total de mama (WBRT). Utilizaron como método 30 conjuntos de tomografías de pacientes previamente tratadas con WBRT. Se generaron planes con las técnicas mencionadas usando el sistema Eclipse, prescribiendo 42,5 Gy en 16 fracciones. Los autores obtuvieron que las técnicas con haces tangenciales mostraron una mejor dosimetría en órganos en riesgo (OAR) ( $p < 0,001$ ). El índice de homogeneidad (HI) fue significativamente distinto entre las técnicas, siendo Ecomp la que obtuvo el mejor HI ( $1,061 \pm 0,029$ ). Además, Ecomp requirió menos tiempo de planificación ( $p < 0,001$ ). Se concluyó que las técnicas con campos tangenciales mejoraron la dosimetría de los OAR. Ecomp fue la más fácil de planificar y mostró una dosimetría aceptable en WBRT con menor tiempo de planificación.

Doi et al. 2020, en este estudio, el objetivo fue evaluar cómo se mejoraron la homogeneidad y la conformidad de la dosis de irradiación en pacientes con cáncer de mama posoperatorio, incluyendo los ganglios linfáticos regionales. Para ello los autores utilizaron un plan de terapia de arco híbrido volumétrico modulado (VMAT), combinando terapia convencional de campo tangencial para la zona torácica y VMAT para las zonas supraclavicular y marginal. Se comparó el impacto dosimétrico de la radioterapia conformada 3D tradicional (3DCRT) con la radioterapia híbrida VMAT en 70 pacientes tratados entre octubre de 2016 y diciembre de 2017, evaluando toxicidades según los criterios comunes de eventos adversos versión 4.0. De lo anterior Doi Y. et

al, obtuvieron como resultados que la dosis prescrita fue de 50 Gy en 25 fracciones, el índice de homogeneidad (HI) y el índice de conformidad (IC) fueron significativamente mejores en el plan Hybrid VMAT en comparación con 3DCRT. No hubo diferencias significativas en la dosis media al pulmón ipsilateral entre ambos planes. Ningún paciente presentó toxicidad aguda  $\geq$  grado 3 o neumonitis  $\geq$  grado 2. Se concluyó que la terapia VMAT híbrido mejoró la homogeneidad y conformidad de la dosis al volumen objetivo, manteniendo la dosis a los órganos en riesgo (OAR) al mínimo, y demostró ser una técnica segura en términos de toxicidad.

Liu et al. en el 2020, se compararon diversos métodos de planificación de radioterapia para el cáncer de mama derecho, con el objetivo de estimar las dosis efectivas en el cuerpo y las dosis absorbidas por los órganos críticos. Metodología: Se examinó una técnica híbrida 3D-CRT/IMRT, terapia de arco modulado volumétrico (VMAT, con arco parcial continuo y no continuo), y radioterapia de intensidad modulada (IMRT). Las dosis para órganos críticos como el corazón y los pulmones se midieron con dosímetros en un maniquí RANDO, y la dosis recomendada fue de 50,4 Gy. Los resultados afirmaron que tanto el arco parcial continuo como el no continuo mostraron mayores niveles de homogeneidad y conformidad. La técnica híbrida 3D-CRT/IMRT mostró la dosis más baja en el corazón (1,47 Gy) y en el lado contrario de la mama. El arco parcial continuo tuvo la dosis más baja en el pulmón derecho y el pulmón contralateral. Sin embargo, en el arco parcial continuo, las dosis efectivas para todo el cuerpo fueron más altas. Se concluyó que la técnica VMAT con arco continuo reduce el riesgo de neumonía por radiación, mientras que la técnica híbrida 3D-CRT/IMRT reduce el riesgo de complicaciones cardiovasculares y malignidad secundaria.

Domingos, en el 2020 en su tesis doctoral tuvo como objetivo validar una técnica híbrida para tratamientos mamarios que combina VMAT y 3D-CRT. En cuanto a sus métodos utilizados fue evaluar las técnicas de tratamiento, en el cual se utilizó un "fantasma" para evaluar la distribución de dosis y la exposición de órganos en riesgo. Resultados: la técnica H-VMAT, también conocida como arcoterapia volumétrica híbrida, demostró una efectividad del 80% de la técnica tridimensional y del 20% del plan VMAT. Esto le permite obtener dosis más altas adecuadas para órganos en riesgo, especialmente la mama contralateral, con una excelente cobertura del volumen objetivo. Llegaron a la conclusión los autores que dichas técnicas híbridas pueden mejorar la

calidad de vida de los pacientes que requieren este tratamiento al reducir la dosis en los tejidos adyacentes y la exposición a órganos de riesgo.

## **1.5. Marco teórico**

En este capítulo se realiza una recopilación y organización de las teorías que forman la base de las variables de investigación, con el objetivo de orientar e identificar las palabras clave del estudio, lo que facilita su ubicación en un campo específico. Además, es fundamental entender que esta recopilación no se limita solo a definiciones, ya que estas son parte de un entramado teórico que conecta conceptos y establece relaciones entre distintos autores.

### ***1.5.1. Cáncer***

Dentro de las variables relacionadas con el tema, se incluye el aspecto del cáncer. Según Puente (2019), la Sociedad Española de Oncología Médica, lo define como un conjunto amplio de enfermedades caracterizadas por la proliferación descontrolada de células anormales que se multiplican, se expanden y se diseminan por diversas partes del cuerpo. A diferencia de las células normales, que se dividen y mueren en un tiempo determinado, las células cancerosas o tumorales "pierden" su capacidad de muerte programada y se propagan prácticamente sin restricciones.

Igualmente, el Instituto Nacional de Cáncer (2021) detalla que los tumores malignos se diseminan (o invaden) los tejidos adyacentes. Además, se podrían expandir a otras partes del cuerpo y formar tumores, un proceso conocido como metástasis, estos tumores cancerosos también se llaman tumores malignos. Sin embargo, diferentes investigaciones indican que, cuando el cáncer es detectado y atendido en etapa inicial, usualmente se puede curar.

El Instituto Nacional de Cancerología (INC) ha investigado las cifras de esta enfermedad en Colombia desde hace más de 5 años, liderando un sistema de información sobre cáncer que proporciona datos de consulta sencillos sobre incidencia y mortalidad en la nación. Durante el último periodo analizado del año 2021, se descubrió que las tasas de mortalidad se incrementaron

de 50 a 85 por cada 100 mil habitantes, lo que representa un incremento del 60% en comparación con el periodo previo (Instituto Nacional de Cancerología , 2021).

Sin embargo, es importante considerar la acción que ha llevado a cabo el estado en relación a esta enfermedad. En el país se han establecido estrategias para incrementar las posibilidades en la prevención, diagnóstico y tratamiento, a través del Ministerio de Salud y Protección Social (2012) con el “Plan nacional para el control del cáncer 2012-2023” y la promulgación de la Ley 1384 de 2010 Ley Sandra Ceballos, que busca reducir la mortalidad y morbilidad por cáncer y mejorar la calidad de vida de los pacientes oncológicos mediante acciones para el control de la enfermedad (El Congreso de Colombia, 2010).

### ***1.5.2. Cáncer de mama***

Según la Sociedad Estadounidense del Cáncer (2019), el cáncer de mama se desarrolla cuando las células en una o ambas mamas comienzan a crecer de manera descontrolada. Aunque es más frecuente en mujeres, los hombres también pueden verse afectados. La mayoría de las masas en los senos son benignas y no se diseminan más allá del tejido mamario, lo que significa que no son cancerosas. Sin embargo, algunos de estos tumores benignos pueden incrementar el riesgo de desarrollar cáncer de mama en el futuro. El radio oncólogo debe evaluar cualquier protuberancia, abultamiento o cambio en ambas mamas para determinar si es benigno o maligno y evaluar el riesgo de evolución a cáncer en el futuro.

Según el Instituto Memorial Sloan Kettering Cancer Center (2018), el cáncer de mama es una patología en la que las células mamarias crecen y se multiplican de manera anormal. Este proceso puede ocurrir cuando los genes responsables de regular el crecimiento celular dejan de funcionar correctamente. Como resultado, las células se dividen de forma descontrolada, lo que puede dar lugar a la formación de un tumor. Este tumor puede ser detectado mediante diversas técnicas de diagnóstico por imagen, como mamografías, ecografías, resonancias magnéticas, tomografías computarizadas y biopsias.

Los factores de riesgo que se encuentra en el cáncer de mama, al igual que gran parte de las patologías oncológicas, tiene un origen multifactorial, de acuerdo a Bartlett J, et. al. (2019) Existen una serie de riesgos que se determinan importantes como la exposición a radiación, edad mayor a 50 años, sexo femenino, el alto consumo de lípidos, sedentarismo, el consumo de alcohol, la menarca temprana y la menopausia tardía, la nuliparidad, los antecedentes de haber tenido este padecimiento, la inmunosupresión, tabaquismo, las infecciones virales (hepatitis B y Epstein-Barr). Sin embargo, los factores de riesgo más relacionados son la historia familiar de cáncer de mama, la presencia de genes como el BRCA1 y BRCA2 y la obesidad.

El diagnóstico temprano del cáncer de mama se asocia con menores costos en la atención, un mejor pronóstico para las pacientes y ahorros significativos. En cambio, se ha observado un aumento en los costos de tratamiento, especialmente en los estadios IIB y IIIC, que pueden llegar a ser hasta ocho veces mayores que los del cáncer de mama en etapas iniciales (Gamboa et al., 2016).

### ***1.5.3. Clasificación del cáncer de mama***

Según Inno et al. (2019), las células cancerígenas de mama presentan receptores en su superficie, citoplasma y núcleo, siendo los más relevantes los relacionados con los estrógenos, la progesterona y la proteína HER2. Con base en la presencia de estos receptores, el cáncer de mama puede clasificarse de la siguiente manera:

Luminal A: presenta receptores positivos para estrógeno y progesterona, lo que se asocia con un buen pronóstico y una respuesta favorable a la terapia hormonal.

Luminal B: se divide en dos subtipos. El luminal B/HER2 positivo presenta receptores positivos para progesterona, estrógeno y HER2, y tiene un pronóstico menos favorable que el luminal A. Este subtipo responde adecuadamente a la inmunoterapia y a la terapia hormonal.

Por otro lado, se encuentra el **\*\*luminal B/HER2 negativo\*\***, que presenta receptores positivos para estrógeno y progesterona. Sin embargo, al ser HER2 negativo, se asocia con un alto riesgo de proliferación celular y responde favorablemente a la hormonoterapia.

#### **1.5.4. Incidencia y mortalidad**

La Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que, a nivel mundial, el cáncer se ha convertido en la principal causa de muerte. Según estadísticas del Instituto Nacional de Cancerología, cada año se diagnostican aproximadamente 18 millones de nuevos casos en todo el mundo. En Colombia, en 2019, se registraron 101.893 nuevos casos de cáncer y 46.057 muertes atribuibles a diversos tipos de tumores. Además, hubo 230.726 casos prevalentes a cinco años.

El mayor riesgo de cáncer de mama se concentra en las capitales, donde, según el Instituto Nacional de Cancerología (2017), la prevalencia está relacionada con procesos de urbanización y factores de riesgo como dietas altas en grasas, obesidad, tabaquismo, edad avanzada en el primer embarazo, baja paridad, así como con la escasa práctica de la lactancia materna y el uso prolongado de anticonceptivos orales.

Estos informes indican que la mayoría de las muertes por cáncer ocurren en países de ingresos bajos o medios. En particular, muchas mujeres son diagnosticadas con cáncer de mama en etapas avanzadas, lo que se atribuye a la falta de concienciación sobre la importancia de la detección temprana y a los obstáculos en el acceso a servicios de salud adecuados.

Según el Instituto Memorial Sloan Kettering Cancer Center (2018), las personas con antecedentes familiares significativos de cáncer de mama tienen de dos a tres veces más probabilidades de desarrollar esta enfermedad. Sin embargo, solo entre el 5% y el 10% de los casos de cáncer de mama son hereditarios, lo que indica que están vinculados a mutaciones genéticas que se transmiten dentro de las familias, como las mutaciones en los genes BRCA1 y BRCA2.

#### **1.5.5. Radioterapia**

La radioterapia es un tratamiento que utiliza rayos X de alta energía para eliminar células cancerosas. La planificación del tratamiento y la dosimetría correspondiente se llevan a cabo mediante Tomografía Computarizada (TAC). La enfermera con especialización en oncología, el

oncólogo radioterapeuta, el físico médico, los tecnólogos en radioterapia son los profesionales encargados del proceso (Mayo Clinic, 2019).

Según la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) en 2023, la radioterapia es un tratamiento para el cáncer que utiliza diferentes tipos de radiación ionizante, incluyendo rayos X, rayos gamma, electrones de alta energía y partículas pesadas. Este enfoque es uno de los tratamientos oncológicos más comunes, ya que aproximadamente el 50 % de los pacientes requerirán radioterapia en algún momento de su enfermedad.

La radioterapia para el cáncer de mama emplea rayos X de alta energía, protones u otras partículas para destruir las células cancerosas. Las células que crecen rápidamente, como las cancerosas, son más susceptibles a los efectos de la radioterapia en comparación con las células normales. Según la Clínica Mayo (2019), los rayos X y las partículas son indoloros e invisibles. En el caso del cáncer de mama, se puede administrar de las siguientes maneras:

**Radiación externa.** La radiación se administra desde un acelerador lineal, que dirige la radiación hacia la mama desde el exterior del cuerpo. Este es el tipo de radioterapia más utilizado para tratar el cáncer de mama.

**Radiación interna (braquiterapia):** Tras la cirugía para extirpar el cáncer, el médico inserta temporalmente un dispositivo de administración de radiación en la mama, específicamente en la zona donde se detectó el cáncer. Durante el tratamiento, se introduce una fuente radiactiva en este dispositivo por cortos períodos de tiempo.

Si el cáncer de mama se ha diseminado (metastatizado) a otras áreas del cuerpo, se puede recomendar la radioterapia para reducir el tamaño del tumor y aliviar síntomas como el dolor. Algunos de los efectos secundarios más comunes durante el tratamiento incluyen:

- Fatiga, una sensación extrema de cansancio que puede durar semanas o meses.
- Cambios en la piel, el área tratada puede experimentar irritación, enrojecimiento o descamación.

- Dolor, puede haber dolor en la zona quirúrgica o durante la radioterapia.
- Náuseas y vómitos, estos son comunes durante la quimioterapia.
- Pérdida de cabello, algunos tratamientos, como la quimioterapia, pueden causar pérdida de cabello.
- Cambios en el apetito, algunas personas pueden perder el apetito o experimentar cambios en el gusto.
- Problemas emocionales entre ellos se encuentra la ansiedad, depresión o cambios de estado de ánimo.
- Linfedema, extirpan ganglios linfáticos, puede ocurrir una hinchazón en el brazo o la mano.

### ***1.5.6. Tratamiento de cáncer de mama***

El tratamiento del cáncer exige estándares mínimos de calidad y tiempo para el diagnóstico. Según la investigación de Allemani C. et al. (2018), los tratamientos para el cáncer de mama requieren un proceso de rehabilitación y seguimiento que contribuye a una mayor supervivencia y eficacia en el manejo de la enfermedad. Los autores sostienen que los pacientes diagnosticados deben recibir atención de profesionales especializados, incluyendo enfermeras con formación en oncología, oncólogos radioterápicos, físicos médicos y tecnólogos en radioterapia.

La oportunidad y el tiempo adecuado para comenzar el tratamiento del cáncer de mama son cruciales. Según Loibl et al. (2011), los tratamientos adyuvantes con quimioterapia deben iniciarse dentro de los 90 días posteriores a la cirugía. Aquellos que exceden este plazo enfrentan un 34% más de riesgo de mortalidad. Además, la supervivencia se ve comprometida por la reducción de dosis y la administración irregular de tratamientos que no se ajustan a los tiempos establecidos en los protocolos.

Es fundamental seguir las recomendaciones establecidas en las Guías de Atención Integral (GAI) para el tratamiento adecuado de las mujeres con cáncer de mama, según la Ley 259 de 2019. Entre las estrategias de tratamiento se incluyen el manejo hormonal adyuvante, la radioterapia adyuvante posterior a la cirugía conservadora en pacientes seleccionados con cáncer de mama en etapas tempranas, la terapia para pacientes con cáncer de mama metastásico o en progresión que

son HER2 positivos, y la combinación de carboplatino con taxanos en el tratamiento neoadyuvante de pacientes con cáncer de mama triple negativo. Además, se incluyen indicaciones para solicitar perfiles de expresión génica en casos de cáncer de mama infiltrante.

### **1.5.6.1. Tipos de tratamiento**

**1.5.6.1.1. Técnica Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT).** La técnica Radioterapéutica de Modulación de Intensidad Volumétrica (VMAT) es una innovadora modalidad de tratamiento que ha revolucionado en cuanto a la administración de la radioterapia.

El método VMAT permite la entrega continua de radiación mientras el acelerador lineal gira alrededor del paciente. La intensidad del haz y la geometría del campo de tratamiento son moduladas simultáneamente por VMAT, a diferencia de las técnicas convencionales de radioterapia que utilizan campos estáticos.

Modulación de Intensidad: se ajusta la intensidad del haz en diferentes segmentos durante el arco de tratamiento, permitiendo una mejor conformación de la dosis.

Arcos de Tratamiento: la radiación se entrega desde múltiples ángulos, lo que permite cubrir el volumen tumoral de manera más efectiva y proteger los tejidos sanos adyacentes.

**1.5.6.1.2. Técnicas híbridas.** Las técnicas híbridas en radioterapia combinan diferentes modalidades de tratamiento para mejorar la precisión y eficacia del control tumoral, al tiempo que se minimizan los efectos secundarios en los tejidos sanos circundantes. Este enfoque integrador aprovecha las ventajas de diversas tecnologías para optimizar la planificación y entrega de la radiación.

Se dice que las técnicas híbridas en radioterapia suelen integrar modalidades como la radioterapia externa (EBRT), la braquiterapia, la radioterapia con protones. La combinación de estas modalidades busca proporcionar un tratamiento más personalizado y eficaz, entre las

modalidades que se consideran híbridas están técnica conformal en combinación con una técnica IMRT o una técnica VMAT.

## **1.6. Metodología**

### ***1.6.1. Paradigma de investigación***

La investigación se enfocó en el paradigma cuantitativo, según Hernández et. al. (2018), en él se hace uso de la recolección de datos basándose en la formulación de las variables que fueron seleccionadas de forma específica, basándose en un modelo estadístico en las cantidades y datos porcentuales. En este caso particular, se llevó a cabo una revisión bibliográfica para analizar la efectividad de las técnicas híbridas y de arcoterapia volumétrica modulada (VMAT) en el ámbito de la radioterapia para el tratamiento del cáncer de mama. Además, se fortaleció del paradigma cualitativo, el cual se aplicó al analizar la efectividad de las técnicas híbridas utilizadas en el tratamiento.

### ***1.6.2. Enfoque de investigación***

La investigación se sustentó en un enfoque empírico analítico, cuya finalidad está en la identificación de los elementos y las relaciones existente entre los aspectos a investigar (Hernández et al., 2018). En este caso concreto, se consideró la recopilación de información bibliográfica acerca de la efectividad de las técnicas híbridas en comparación con la arcoterapia volumétrica modulada (VMAT) en el tratamiento radioterapéutico del cáncer de mama.

### ***1.6.3. Tipo de investigación***

Este estudio adoptó un enfoque descriptivo. Según Namakforoosh (s.f.), la metodología de investigación descriptiva busca responder preguntas como quién, dónde, cuándo, cómo y por qué respecto al sujeto de estudio. En otras palabras, este tipo de investigación permitió describir de manera detallada y explícita aspectos relacionados con organizaciones, consumidores, procesos,

conceptos o cuentas. Se utiliza cuando el objetivo es caracterizar ciertos grupos o explicar una situación específica, además de pronosticar posibles resultados.

En la presente investigación se adoptó el tipo documental, lo que implica analizar el conocimiento acumulado y registrado en un área específica. Su propósito es interpretar el material documental mediante una revisión minuciosa y detallada de los textos que abordan el tema en cuestión. Por tanto, esta investigación se centró en el análisis de estudios bibliográficos, siguiendo las categorías establecidas en los objetivos planteados.

#### ***1.6.4. Técnicas e instrumentos de recolección de información***

**1.6.4.1. Técnicas. Revisión documental.** Para iniciar la construcción del marco teórico de esta investigación, se dispuso de una extensa literatura internacional en bases de datos mediante la búsqueda de artículos científicos publicados en revistas electrónicas indexadas, relacionados con el tema de estudio. Se utilizaron palabras clave como: cáncer de mama, técnicas híbridas de tratamiento, técnica VMAT y dosimetría. Tras establecer una estrategia de búsqueda y selección de referencias, se procedió a elegir el contenido bibliográfico relevante.

#### **Tabla 1**

*Matriz de revisión documental*

No. artículo
Base de datos
Referencia
País
Idioma
Año de publicación
Objetivo
Método
Resultados
Conclusiones
Terapias híbridas utilizadas
VMAT
Ventajas
Desventajas

**1.6.4.2. Instrumentos de información.** Las fuentes de información utilizadas en este estudio incluyen una revisión de diversas bases de datos, como Google Scholar, SciELO, Elsevier, LILACS, Medigraphic y PubMed. La investigación se centra en analizar la literatura sobre la efectividad de las terapias híbridas en comparación con la técnica de arcoterapia volumétrica modulada (VMAT). Se tomaron en cuenta palabras clave en español e inglés, como "eficacia de las terapias híbridas en comparación con VMAT", "ventajas de las terapias híbridas en comparación con VMAT" y "desventajas de las terapias híbridas en comparación con VMAT".

### ***1.6.5. Criterios de inclusión y exclusión***

Criterios de inclusión

Artículos en inglés y español,

Estudios de terapias híbridas vs VMAT en radioterapia de cáncer de mama

Artículos publicados en el año 2020 a 2024 en revistas indexadas

Artículos que se enfoquen específicamente en terapias híbridas y VMAT en cáncer de mama

Criterios de exclusión:

Artículos con información incompleta

Aquellas publicaciones que aborden terapia radioterapéutica diferentes a las mencionadas en el estudio.

### ***1.6.6. Elementos de datos***

Se recopilaron 30 elementos de datos relacionados con los estudios analizados, los cuales son fundamentales para alcanzar los objetivos planteados en la investigación. Aunque inicialmente se registraron 40 artículos, después de una revisión exhaustiva se seleccionaron 30, ya que estos cumplían con los criterios de inclusión establecidos en la fase inicial del proceso.

### ***1.6.7. Plan de análisis de resultados***

Para sintetizar la información, se llevó a cabo un proceso de vaciado de datos, en el cual se analizó cada estudio y se extrajeron los aportes relevantes para la revisión sistemática de la literatura, de acuerdo con los objetivos establecidos. Así, se lograron identificar los artículos que eran pertinentes para la temática en investigación.

En el primer objetivo que hace relación a la caracterización de los artículos, se hace uso de frecuencias y porcentajes, cuya finalidad es verificar la información relacionada con aspectos básicos que permitieron dar una visualización de los resultados.

Además, se realizó un proceso de extracción y filtrado de los artículos seleccionados, en el cual se clasificaron aquellos que cumplían con los criterios de inclusión y que aportaban a los objetivos establecidos en el estudio.

## 2. Presentación de resultados

### 2.1. Caracterización de los artículos

**Tabla 2**

*Distribución porcentual de la base de datos de búsqueda*

Base de datos	Frecuencia	Porcentaje
Google académico	20	67%
Scielo	9	30%
Lilac	1	3%
Total	30	100%

En la tabla anterior se observa que la base de datos más utilizada es Google Académico, con un 67%, correspondiente a 20 artículos. Le sigue Scielo, que representa el 30% con 9 artículos, y finalmente Lilacs, con un 3%, equivalente a 1 artículo. De acuerdo a lo anterior, Google Académico es la fuente más utilizada en esta revisión, representando más de dos tercios del total. Esto podría deberse a su fácil acceso y amplia cobertura de artículos académicos de diferentes disciplinas, incluyendo trabajos de libre acceso y publicaciones indexadas en diferentes bases de datos.

**Tabla 3**

*Distribución porcentual del país de los artículos incluidos*

País	Frecuencia	Porcentaje
China	7	24%
Turquía	4	14%
Australia	3	10%
India	3	10%
Alemania	2	7%
Brasil	2	7%
Polonia	2	7%
Rusia	2	7%
Estados Unidos	1	3%
Francia	1	3%
Japón	1	3%
España	1	3%
Italia	1	3%
Total	30	100%

La tabla presenta una distribución de 30 artículos revisados según el país de origen, encontrándose que el 24% es de China, seguido por el 14% Turquía, 10% Australia e India respectivamente, además, el 7% de Alemania, Brasil, Polonia y Rusia respectivamente, en menor porcentaje con el 1% en Estados Unidos, Francia, Japón, España e Italia.

El porcentaje mayoritario destaca la importancia de China como productor de investigaciones científicas. Su alto porcentaje refleja una tendencia de crecimiento en la producción académica, en especial en áreas como la ingeniería, la biomedicina, las ciencias físicas y la tecnología.

**Tabla 4**

*Distribución porcentual del idioma de los artículos*

<b>Idioma</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Porcentaje</b>
Inglés	26	87
Portugués	2	7
Francés	1	3
Turco	1	3
Total	30	100%

La tabla anterior muestra que el 87% de los artículos están publicados en inglés, lo que lo convierte en el idioma predominante y el más utilizado por la mayoría de los autores, lo que sugiere una clara preferencia por este idioma. En segundo lugar, el portugués representa el 7%, manteniendo su relevancia entre una pequeña parte de los autores. Finalmente, tanto el francés como el turco ocupan un 3% cada uno, con una representación menor en comparación con los otros idiomas. Los datos anteriores evidencia que las dinámicas de comunicación y acceso a la información, está enfocada en primer lugar por el idioma inglés, constituyéndose como uno de los más utilizados para publicar los artículos científicos.

**Tabla 5***Distribución porcentual del año de publicación de los artículos*

<b>Año de publicación</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Porcentaje</b>
2020	6	20%
2021	2	7%
2022	7	23%
2023	11	37%
2024	4	13%
Total	30	100%

En la tabla anterior se detalla la distribución de las publicaciones por año, destacando que el 2023 fue el año más productivo, con 11 artículos publicados, lo que representa el 37% del total. Le sigue el año 2020, con 6 artículos, equivalentes al 20%, un porcentaje significativo que refleja la capacidad de adaptación de los investigadores en un contexto marcado por los desafíos de la pandemia. En 2022, se observa un repunte en la actividad académica, con 7 artículos publicados, lo que corresponde al 23% del total, lo que indica una tendencia de recuperación tras el descenso de publicaciones en años anteriores. Por su parte, en 2024, aunque aún no ha finalizado, ya se han publicado 4 artículos, representando el 13% de la producción, con posibilidades de aumento hacia el cierre del año. Finalmente, el año 2021 presenta la menor proporción, con solo 2 artículos publicados, lo que corresponde al 7% del total.

**Tabla 6***Distribución porcentual de las terapias híbridas y VMAT*

<b>Terapias</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Porcentaje</b>
VMAT	6	20%
H-VMAT	4	13%
H-IMRT H-VMAT	4	13%
H-IMRT	3	10%
VMAT+3DCRT	2	7%
Arcos clásicos (clVMAT), arcos tangenciales (tVMAT) y arcos divididos (spVMAT)	1	3%
JO-VMAT, tVMAT	1	3%
IMRT – VMAT	1	3%
IMRT+3DCRT – IMRT+VMAT	1	3%
DFB-FiF (Field in Field de has aplanado dinámicamente)	1	3%
radioterapia híbrida de intensidad modulada (HYI) – Terapia híbrida de arco volumétrico modulado (HYV) y arco reducido VMAT (BT)	1	3%
3DCRT+VMAT – IMR+VMAT – 3DCRT FIF	1	3%
intensity-modulated radiation therapy (fIMRT)	1	3%
tIMRT – Tvmat	1	3%
VMAT combinado – terapia convencional de campo tangencial	1	3%
3D-CRT/IMRT	1	3%
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>100</b>

En la tabla anterior se presentan los resultados de la revisión bibliográfica sobre las terapias híbridas y VMAT (Radioterapia de Intensidad Modulada Volumétrica). De un total de 30 artículos analizados, se identificaron 6 que corresponden al 20% y se enfocan en la técnica VMAT. A continuación, el 13% de los estudios se relacionan con H-VMAT y H-IMRT (Radioterapia de Intensidad Modulada con Haz Híbrido). Además, se observó que el 7% de los artículos, equivalente a 2, abordan la combinación de VMAT y 3DCRT (Radioterapia Conformacional en Tres Dimensiones). Por último, en menor proporción, se encontró un artículo que representa el 3% y que se centra en diversas terapias híbridas aplicadas en el tratamiento del cáncer de mama. Estos datos destacan la diversidad de enfoques terapéuticos utilizados en este campo, reflejando la evolución de las técnicas de radioterapia para mejorar los resultados clínicos en pacientes con cáncer de mama.

## 2.2. Ventajas y desventajas de las terapias híbridas y Vmat

### 2.2.1. Terapia VMAT

**Tabla 7**

*Ventajas y desventajas de las terapias VMAT en cáncer de mama*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Exploración del potencial de los iones de helio para la radioterapia del cáncer de mama del lado izquierdo después de una mastectomía	(Bonaccorsi, y otros, 2024)	Esta terapia reduce la dosis de radiación a órganos cercanos, como el corazón, las arterias y los pulmones, minimizando el riesgo de toxicidad, neumonitis por radiación y eventos coronarios graves. También disminuye la probabilidad de desarrollar cáncer secundario en el pecho derecho debido a la menor dosis en esa zona. En general, la terapia con partículas, especialmente con iones de helio, ofrece menores dosis a los pulmones y corazón, reduciendo el riesgo de toxicidad a largo plazo.	Los tratamientos con partículas, como protones y helio, suelen ser más costosos que las terapias tradicionales con fotones, lo que puede limitar su accesibilidad. Además, el uso de más haces de partículas para una cobertura óptima podría aumentar el tiempo de tratamiento. A pesar de sus beneficios potenciales, los estudios clínicos con iones de helio son aún limitados, y se requiere más investigación para validar su superioridad a largo plazo frente a otras terapias.
Robustez del VMAT ante errores de configuración en radioterapia posmastectomía del lado izquierdo: impacto del espesor del bolo	(Yipeng, 2023).	El uso del VMAT con un bolo virtual de 5 mm ofrece ventajas significativas sobre el método tradicional de 10 mm. Su robustez ante errores interfractionales, junto con la reducción en la dosis a órganos circundantes y menores incrementos de dosis ante desviaciones, lo posicionan como una opción preferible en la práctica clínica. Al priorizar tanto la efectividad del tratamiento como la seguridad del paciente, el VMAT-5B representa un avance importante en la búsqueda de resultados óptimos en radioterapia.	Aunque VMAT-5B ofreció una buena cobertura del objetivo, VMAT-10B mostró un mejor rendimiento en la cobertura de la región superficial de la pared torácica.  VMAT-10B fue más susceptible a errores de configuración de 3 mm, especialmente en las direcciones posterior y derecha, lo que redujo significativamente la cobertura en el CTV y podría afectar la efectividad del tratamiento. Además, mostró un mayor incremento en la dosis media al corazón y al pulmón izquierdo en comparación con VMAT-5B cuando se presentaban errores de configuración.

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Técnica de arcoterapia modulada volumétrica totalmente automatizada para la radioterapia del cáncer de mama localmente avanzado	(Marrazzo et al., 2023)	VMAT tiene un tiempo de planificación promedio de 1 hora, mucho más rápido que las 6 horas de tomografía helicoidal (HT), y su tiempo de administración es de 3 minutos frente a los 17 minutos de HT, lo que reduce significativamente el tiempo total de tratamiento. VMAT ofrece mejor cobertura para el PTV de los ganglios linfáticos mamaros internos y dosis más bajas en órganos como el pulmón contralateral, la mama contralateral y el esófago, disminuyendo el riesgo de efectos adversos. Además, su planificación automatizada reduce la variabilidad entre operadores y mejora la consistencia de los planes en comparación con la planificación manual de HT.	VMAT presenta un mayor riesgo de "puntos calientes" (V105%) en algunas áreas del volumen objetivo en comparación con HT, aunque reduce la dosis en varios órganos. Sin embargo, no muestran diferencias significativas en la dosis media para el corazón y el pulmón ipsilateral frente a HT. Además, la planificación automática de VMAT, que depende de sistemas avanzados como el algoritmo mCycle, no está disponible en todas las clínicas.
Efecto del uso de bolo virtual en la calidad del plan VMAT para pacientes con cáncer de mama del lado izquierdo	(Ugurlu et al., 2022)	El uso de bolos virtuales mejora la cobertura del volumen blanco planificado (PTV) y elimina la necesidad de bolos físicos, lo que aumenta la comodidad del paciente y reduce la variabilidad en la dosimetría. Las mediciones con dosímetros termoluminiscentes validan la precisión del sistema de planificación del tratamiento (TPS). Además, permite ajustar el grosor del bolo virtual sin comprometer la calidad del plan, reduce el riesgo de complicaciones en la piel y optimiza el tiempo de planificación, siendo especialmente beneficioso en centros con alta demanda.	El uso de bolos virtuales de más de 0,5 cm puede reducir la calidad del plan, afectando la homogeneidad y conformidad del tratamiento. No es adecuado para todos los pacientes, ya que algunos requieren bolos físicos para una cobertura adecuada en áreas específicas, especialmente en anatomías irregulares o geometrías complejas. Además, exige alta precisión en el sistema de planificación y administración, lo cual puede no estar disponible en todos los centros. Aunque los datos de planificación son confiables, puede haber discrepancias con las mediciones reales. El riesgo de toxicidad en órganos cercanos no se elimina por completo, y su implementación puede ser más difícil en centros sin software avanzado.
Estrategia de control y optimización de la dosis cardíaca para la radioterapia con cáncer de mama	Jianjian et al, 2021	Reducción de la dosis cardíaca, al minimizar la dosis recibida por el corazón durante el tratamiento. Mejor conformación de dosis: se puede administrar una dosis	Requerimiento de equipo técnico especializado y formación adicional para el personal médico y técnico; costos iniciales elevados; dependencia del software y

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
izquierdo con tecnología VMAT no uniforme.		efectiva al tumor mientras se protege mejor el tejido sano circundante, es crucial para minimizar los efectos secundarios; eficiencia en el tiempo de administración mejora la eficiencia del tratamiento, aumentado la comodidad del paciente al reducir el tiempo que debe permanecer en la mesa de tratamiento.	tecnología. Variabilidad en resultados clínicos.
Dosis cardíaca en el tratamiento de pacientes con cáncer de mama bilateral sincrónico entre tres técnicas de radioterapia diferentes (VMAT, IMRT y 3D CRT)	(Salim et al., 2023)	La técnica VMAT ofrece una mejor cobertura del volumen de tratamiento planificado (PTV) con un V95% de 98.71%, y reduce la dosis promedio en órganos a riesgo (OARs) como los pulmones y el miocardio en comparación con 3D CRT. También disminuye la dosis en arterias coronarias como la LADA y RCA, y presenta mejor conformidad (CI: 1.02) y homogeneidad (HI: 1.08) en comparación con IMRT y 3D CRT. Es especialmente adecuada para proteger el sistema de conducción cardíaco.	La VMAT, presenta la dosis promedio más baja en el miocardio, los valores en la banda de bajas dosis (LDB) son más altos en comparación con 3D CRT, aumentando el riesgo de cánceres secundarios inducidos por radiación. Además, la dosis al RCA es mayor en comparación con 3D CRT.

En la tabla anterior se presenta la técnica de radioterapia VMAT, específicamente aplicada al tratamiento del cáncer de mama. Una de las ventajas más destacadas de esta técnica es su capacidad para reducir significativamente la dosis de radiación a los órganos adyacentes, como el corazón, las arterias y los pulmones. Esta reducción en la exposición a la radiación no solo disminuye el riesgo de toxicidad aguda y crónica en estos órganos, sino que también contribuye a prevenir complicaciones graves como la neumonitis inducida por radiación y eventos coronarios. Además, al limitar la irradiación de tejidos sanos, se reduce la probabilidad de desarrollar cáncer secundario en áreas como el lado derecho del pecho. En resumen, la técnica VMAT no solo mejora la seguridad y el perfil de riesgo del tratamiento, sino que también puede tener un impacto positivo en la calidad de vida de los pacientes al minimizar los efectos secundarios a largo plazo.

Asimismo, el uso de partículas, como iones de helio, reduce la dosis a los pulmones y corazón, disminuyendo la toxicidad a largo plazo. VMAT con bolo virtual de 5 mm es más eficiente y preciso que el de 10 mm, resistiendo mejor los errores inter fraccionales y desviaciones. Además, tiene un tiempo de planificación de 1 hora y administración de 3 minutos, mucho más rápido que HT (6 horas de planificación y 17 minutos de administración), mejorando la comodidad del paciente. VMAT también cubre mejor el PTV de los ganglios linfáticos mamarios y reduce la dosis a órganos como el pulmón contralateral y esófago, minimizando efectos adversos.

La planificación automatizada de VMAT asegura mayor consistencia en los planes y reduce la variabilidad. El uso de bolos virtuales mejora la cobertura del volumen blanco, elimina bolos físicos y aumenta la comodidad del paciente. Además, las mediciones con dosímetros validan la precisión del tratamiento, mientras que el ajuste del bolo virtual optimiza la planificación y reduce complicaciones en la piel. Estas características mejoran la conformación de la dosis, disminuyen la dosis cardíaca y aumentan la eficiencia del tratamiento, mejorando tanto la seguridad como la efectividad.

Del mismo modo, se tuvieron en cuenta las desventajas de técnicas avanzadas como la terapia con partículas y VMAT en donde se incluyen su alto costo, lo que limita su accesibilidad en muchos centros. Además, el uso de más haces para garantizar una cobertura óptima puede aumentar el tiempo de tratamiento, afectando la comodidad del paciente y la eficiencia del proceso.

VMAT-10B, aunque ofrece buena cobertura, es más susceptible a errores de configuración, especialmente en áreas posteriores y derechas, lo que puede reducir la cobertura y efectividad del tratamiento. Además, estos errores aumentan la dosis al corazón y al pulmón izquierdo, elevando el riesgo de efectos secundarios.

El uso de bolos virtuales mayores de 0,5 cm puede reducir la calidad del tratamiento, afectando la homogeneidad y conformidad, lo que disminuye la precisión en ciertas áreas. Además, algunos pacientes con anatomías complejas aún requieren bolos físicos para una cobertura adecuada.

Otra desventaja significativa de la técnica VMAT radica en la necesidad de contar con un equipo técnico especializado y formación adicional, unido a lo anterior, los altos costos iniciales de adquisición e instalación de los equipos de radioterapia avanzada constituyen una barrera importante para la adopción generalizada de estas tecnologías. Asimismo, la variabilidad en los resultados clínicos observados en diferentes estudios genera incertidumbre sobre los beneficios a largo plazo de la técnica; a pesar de las promesas que ofrece, la falta de datos concluyentes sobre su eficacia y su impacto en la supervivencia y calidad de vida de los pacientes plantea preguntas sobre su implementación generalizada.

### 2.2.2. Terapia híbrida H-VMAT

**Tabla 8**

*Ventajas y desventajas de las terapias híbridas H-VMAT*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
La radioterapia del cáncer de mama: análisis de la técnica de terapia del arco híbrido.	Domingos et al., 2024	La combinación de VMAT y 3D-CRT mejora la cobertura y conformación de la radiación en el volumen objetivo. Los planes híbridos, como el H-VMAT con 80% 3D-CRT y 20% VMAT, reducen significativamente la dosis en órganos cercanos, como el corazón y el pulmón contralateral, minimizando el riesgo de efectos secundarios. Esta técnica también disminuye la exposición a órganos adyacentes, lo que reduce la posibilidad de toxicidades tardías, como cardiopatía o neumonitis. Además, los planes híbridos reducen las dosis a la mama contralateral, minimizando el riesgo de cáncer secundario.	Aumentar el porcentaje de VMAT, como en H-VMAT50/50, eleva la dosis en órganos de riesgo, como el pulmón ipsilateral, superando en algunos casos los límites recomendados. Además, la planificación de la terapia híbrida requiere más recursos y precisión técnica que las técnicas aisladas de 3D-CRT o VMAT.
Evaluación crítica del riesgo de cáncer secundario después de la radioterapia de mama con técnicas	(Zhang et al., 2023)	Las técnicas híbridas como H-VMAT mejoran la cobertura del volumen objetivo y la conformidad de dosis, reduciendo las dosis altas en	Aunque las técnicas híbridas mejoran la cobertura del objetivo, pueden causar irradiaciones de dosis bajas en órganos no objetivo,

Título	Autores	Ventajas	Desventajas
de radioterapia híbrida		órganos de riesgo, como el corazón y los pulmones. Estas técnicas disminuyen la toxicidad en órganos clave, como el corazón, en comparación con otras técnicas. La evaluación individual basada en parámetros anatómicos permite personalizar el tratamiento y reducir riesgos en órganos cercanos, como la mama contralateral y el pulmón. Según la técnica y los parámetros anatómicos, las técnicas híbridas también pueden disminuir el riesgo de cáncer secundario en órganos como la mama contralateral.	aumentando el riesgo de cáncer secundario en áreas como el pulmón. Los riesgos de cáncer secundario y toxicidad varían según las características anatómicas, lo que requiere una evaluación detallada para optimizar la técnica. Además, estas técnicas pueden aumentar el tiempo de planificación debido a su complejidad y necesidad de equilibrar dosis y minimizar efectos secundarios. Técnicas como H-VMAT también pueden ser más difíciles de implementar por la precisión requerida en la posición del paciente.
Terapia de arco modulado volumétrico híbrido para la radioterapia hipofraccionada del cáncer de mama: un estudio de planificación del tratamiento.	(Venjakob et al, 2021)	Se observó una reducción significativa en la exposición de órganos en riesgo, como los pulmones ipsilaterales, el corazón y la mama contralateral, disminuyendo el riesgo de efectos secundarios a largo plazo. H-VMAT reduce la dosis a los tejidos sanos fuera del volumen objetivo, minimizando los efectos secundarios. Además, el uso de energías de fotones más bajas (6 MV) en VMAT mejora la planificación y reduce el tiempo de tratamiento.	El uso de filtros de cuña dura en la planificación 3D-CRT puede aumentar el número de unidades de monitor y prolongar el tiempo de tratamiento, lo que disminuye la eficiencia. Algunos esquemas híbridos con filtros de cuña también aumentan el tiempo de exposición, lo que puede hacer el tratamiento menos cómodo para el paciente. Aunque la técnica mejora la cobertura de dosis, las áreas de baja dosis pueden incrementarse, lo que podría aumentar el riesgo de tumores secundarios a largo plazo, especialmente en pacientes jóvenes.
Validación de una técnica híbrida en arcoterapia volumétrica (H-VMAT) para tratamiento de mama.	(Domingos, 2020)	La técnica H-VMAT integra la tecnología avanzada de VMAT con 3D-CRT, lo que permite lograr una distribución de dosis más precisa en los órganos en riesgo y una cobertura óptima del volumen objetivo. Con una proporción de 80% de 3D-CRT y 20% de VMAT, esta técnica reduce la dosis en órganos en riesgo, como la mama contralateral y los pulmones, lo que a su vez disminuye los efectos secundarios, especialmente en la mama contralateral. Además, mejora	VMAT con arco continuo puede causar una mayor dispersión de dosis en órganos cercanos, como el cristalino y la piel, aumentando el riesgo de efectos secundarios.

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
		la conformación de la radiación dirigida al volumen objetivo y minimiza la exposición de los órganos adyacentes, lo que contribuye a una mejor calidad de vida para las pacientes.	

En la tabla anterior, se hace relación a las ventajas a la terapia híbrida H-VMAT, en él se destaca la mejora en la cobertura y conformación de la radiación, asegurando una administración más precisa y eficiente de la dosis, lo que reduce la exposición a órganos cercanos como el corazón y los pulmones, minimizando riesgos de efectos secundarios graves y cáncer secundario, especialmente en la mama contralateral.

Otra ventaja es la personalización del tratamiento basada en una evaluación anatómica individualizada, lo que permite adaptar los planes específicos para cada paciente y optimizar la dosis administrada. Esto contribuye a mejorar la calidad de vida y a disminuir los efectos secundarios a largo plazo, lo cual es especialmente relevante para los pacientes jóvenes con cáncer.

Es importante mencionar que la utilización de fotones de baja energía (6 MV) en VMAT optimiza la planificación y reduce el tiempo de entrega del tratamiento, lo que incrementa la eficiencia y minimiza la exposición innecesaria a la radiación, reduciendo así el riesgo de desarrollar cánceres secundarios.

La técnica híbrida H-VMAT, que combina VMAT y 3D-CRT, es efectiva en la reducción de dosis a tejidos sanos fuera del volumen objetivo, minimizando efectos secundarios y mejorando la distribución de la radiación.

En este contexto, las técnicas híbridas como H-VMAT proporcionan una mayor precisión en el tratamiento y disminuyen la exposición a la radiación en órganos en riesgo, lo que resulta en una reducción de los efectos secundarios y una mejora en la calidad de vida de los pacientes.

En cuanto a las desventajas, el uso creciente de VMAT, especialmente en enfoques híbridos como H-VMAT50/50, conlleva un aumento en la dosis de radiación en órganos en riesgo, como el

pulmón ipsilateral, que puede exceder los límites recomendados. Además, la planificación de estas técnicas híbridas exige más recursos y un mayor nivel de precisión técnica en comparación con las metodologías tradicionales, lo que incrementa la complejidad del tratamiento.

A pesar de mejorar la cobertura del objetivo, estas técnicas pueden provocar irradiaciones de dosis bajas en órganos no objetivo, elevando el riesgo de cáncer secundario, especialmente en áreas sensibles como el pulmón. Los riesgos de toxicidad varían según la anatomía del paciente, lo que demanda una evaluación detallada. Además, la planificación puede ser más prolongada debido a la necesidad de equilibrar la dosis y minimizar efectos secundarios.

**Tabla 9**

*Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: arcos clásicos (clVMAT), arcos tangenciales (tVMAT) y arcos divididos (spVMAT)*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Técnica VMAT no isocéntrica para el cáncer de mama: reducción efectiva de la dosis en órganos en riesgo y su aplicabilidad en función de la anatomía del paciente	(Prokófev y Salim, 2024)	La técnica offVMAT reduce significativamente la dosis en órganos como el corazón y los pulmones en comparación con tVMAT y spVMAT, especialmente en pacientes con geometrías anatómicas complejas. Ofrece una mejor cobertura del volumen objetivo (PTV) y un gradiente de dosis más pronunciado entre el PTV y los órganos circundantes. Es particularmente efectiva para pacientes con anatomías complejas, donde otras técnicas pueden no cumplir con los objetivos clínicos. Además, permite una planificación más precisa al ajustar el isocentro fuera del volumen objetivo, minimizando la exposición de los órganos sanos expuestos a radiación.	La técnica offVMAT es más compleja de planificar que las técnicas convencionales, lo que puede aumentar el tiempo de planificación inicial. Requiere más unidades monitor (MU) y tiempos de irradiación más largos, lo que podría extender la duración del tratamiento. En algunos casos, se ha observado un aumento en las dosis a órganos contralaterales, como el pulmón y la mama contralateral, aunque dentro de niveles aceptables.

La técnica offVMAT ofrece ventajas clave en pacientes con anatomías complejas, destacándose por reducir significativamente la dosis en órganos críticos como el corazón y los pulmones, lo que

disminuye riesgos de efectos secundarios graves. Además, mejora la precisión al asegurar una mejor cobertura del volumen objetivo (PTV) y un gradiente de dosis más pronunciado entre el PTV y los órganos circundantes, lo que aumenta la efectividad y reduce la toxicidad en tejidos sanos. Su capacidad para ajustar el isocentro fuera del volumen objetivo la convierte en una opción valiosa en situaciones donde las técnicas convencionales no son suficientes.

La técnica offVMAT presenta desventajas, como una mayor complejidad en la planificación, lo que requiere más tiempo en su preparación, un factor desafiante en entornos clínicos con alta demanda. Además, el uso elevado de unidades monitor (MU) y tiempos de irradiación más largos pueden extender la duración del tratamiento, afectando la comodidad del paciente y la eficiencia operativa. También existe un riesgo de aumento en la dosis a órganos contralaterales, como el pulmón y la mama, aunque dentro de niveles aceptables, lo que podría aumentar el riesgo de efectos secundarios a largo plazo.

**Tabla 10**

*Ventajas y desventajas de las terapias híbridas JO-VMAT, tVMAT*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Minimización del baño de dosis baja de tejido normal para la terapia de arco modulado volumétrico (VMAT) de la mama izquierda utilizando desplazamiento de mandíbula	(Zhang et al., 2024)	Las técnicas VMAT, especialmente JO-VMAT, mejoran la cobertura de dosis en el volumen objetivo (PTV) frente a técnicas convencionales como 3D-FiF. JO-VMAT ofrece una mejor conformidad en la distribución de dosis, minimizando la exposición no deseada en tejidos cercanos. Además, reduce significativamente las dosis a órganos a riesgo (OARs) como el corazón, pulmones y seno contralateral, disminuyendo el riesgo de efectos secundarios a largo plazo, como enfermedades cardíacas y cánceres secundarios, en	La planificación de JO-VMAT es más compleja y personalizada, lo que aumenta el tiempo de planificación y requiere expertos en dosimetría. El uso de múltiples arcos y colimadores de hojas múltiples (MLC) puede alargar la duración del tratamiento. Aunque tVMAT mejora la cobertura, también incrementa la exposición de baja dosis en órganos cercanos debido a la dispersión de la radiación.

---

comparación con tVMAT y  
3D-FiF.

---

Una de las principales ventajas de JO-VMAT es su capacidad para optimizar la distribución de la dosis de radiación en el tumor, asegurando que la mayor parte de la energía se dirija al área objetivo y minimizando la radiación innecesaria a los tejidos sanos. Esta precisión es fundamental para proteger órganos en riesgo (OAR), como el corazón, los pulmones y la mama contralateral, lo que, a su vez, reduce el riesgo de efectos secundarios a largo plazo, como enfermedades cardíacas y cánceres secundarios. Además, JO-VMAT contribuye a mejorar la calidad de vida de los pacientes al disminuir la exposición a la radiación en los órganos sanos, un aspecto especialmente importante para aquellos pacientes jóvenes o con una larga expectativa de vida.

La técnica JO-VMAT presenta desventajas, como la complejidad en la planificación del tratamiento, que requiere un proceso más detallado y personalizado en comparación con técnicas convencionales como 3D-FiF. Esto demanda más tiempo y la experiencia de profesionales capacitados, lo que puede aumentar costos y tiempos de preparación, representando una carga adicional para los centros médicos.

Las técnicas VMAT, en particular JO-VMAT, ofrecen beneficios significativos en términos de cobertura tumoral y protección de órganos en riesgo, lo que contribuye a reducir los efectos secundarios a largo plazo y a mejorar la calidad de vida de los pacientes. No obstante, también conllevan ciertos desafíos, como la complejidad en la planificación y la posible extensión del tiempo de tratamiento, lo que podría afectar su accesibilidad y aumentar los costos. La selección de la técnica más adecuada debe realizarse mediante una evaluación minuciosa de cada caso clínico, teniendo en cuenta tanto sus ventajas como sus limitaciones.

**Tabla 11***Ventajas y desventajas de las terapias híbridas H-IMRT*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Estudio dosimétrico del plan de tratamiento de radioterapia de intensidad modulada híbrida con haz de fotones libres de filtro aplanado para carcinoma de mama: estudio de planificación del tratamiento	(Subhas et al., 2023)	El plan híbrido que utiliza un haz sin filtro aplanador (6FFF) disminuye la radiación en órganos adyacentes, como el corazón, los pulmones y la mama contralateral. Esto no solo reduce los efectos secundarios a largo plazo, sino que también agiliza el tratamiento, lo que mejora la comodidad del paciente y minimiza la exposición a los tejidos sanos.	La ausencia de filtro aplanador permite un tratamiento más rápido, pero requiere más unidades de monitorización para administrar la dosis, lo que puede aumentar el desgaste del equipo.
Viabilidad de la planificación del tratamiento IMRT híbrido para la irradiación de la pared torácica del lado izquierdo: un estudio comparativo de planificación del tratamiento.	(Haldar et al., 2023)	La MRT e IMRT Híbrida ofrecen mejor cobertura del PTV que FiF, proporcionando mayor precisión y menor exposición a tejidos sanos. La IMRT Híbrida reduce la radiación en OAR como el corazón y los pulmones, minimizando efectos secundarios a largo plazo. Además, es más eficiente en tiempo de tratamiento y uso de MU, lo que puede reducir el riesgo de cánceres secundarios inducidos por radiación.	La IMRT es más precisa, pero aumenta la exposición de tejido sano a dosis bajas de radiación, lo que incrementa el riesgo de cánceres secundarios y su costo. En cambio, la técnica FiF es más rápida y fácil de aplicar, aunque menos precisa, con peor distribución de dosis y mayor exposición de órganos en riesgo.
Estimación del segundo riesgo de cáncer primario debido a la terapia de protones en comparación con la IMRT híbrida para el cáncer de mama izquierdo	(Santos et al., 2021)	La terapia de protones (IMPT) disminuye el riesgo de desarrollar cánceres secundarios, especialmente en los pulmones y la mama contralateral, en comparación con la h-IMRT. Asimismo, reduce la dosis de radiación en órganos como el corazón y los pulmones, lo que contribuye a una mejor calidad de vida a largo plazo y a un menor riesgo de enfermedades cardíacas, gracias a su mayor precisión en la distribución de la dosis.	La terapia de protones es menos accesible que la radioterapia de fotones debido a su elevado costo y a la necesidad de contar con infraestructura especializada, lo que eleva los gastos del tratamiento. Además, la planificación de este tipo de terapia es más complicada y requiere un mayor tiempo para ajustar con precisión el haz de protones.

Una ventaja clave del plan híbrido con haz sin filtro aplanador (6FFF) es su capacidad para reducir la radiación en órganos cercanos al área de tratamiento, lo que disminuye la exposición innecesaria en tejidos sanos y los efectos secundarios a largo plazo. Además, esta técnica acelera

el tratamiento, mejorando la comodidad del paciente y minimizando la exposición total a la radiación, lo que es especialmente beneficioso para aquellos que requieren múltiples sesiones.

Por otro lado, la técnica FiF (Campos Fijos en 3D) es rápida y fácil de implementar, pero presenta limitaciones en precisión y distribución de dosis, lo que puede aumentar la exposición de órganos en riesgo y comprometer la seguridad a largo plazo de los pacientes, a pesar de su eficiencia en tiempo.

Las técnicas avanzadas, como la Radioterapia Modulada en Intensidad (IMRT) y la IMRT híbrida, ofrecen ventajas significativas en cuanto a la cobertura del volumen objetivo y la protección de los tejidos sanos. Estas técnicas permiten una distribución de dosis más precisa y, en el caso de la IMRT híbrida, disminuyen la radiación en órganos vitales como el corazón y los pulmones, lo que reduce el riesgo de enfermedades cardíacas y de cánceres inducidos por radiación. Esto contribuye a mejorar considerablemente la calidad de vida de los pacientes a largo plazo. Además, la IMRT híbrida es más eficiente en términos de tiempo de tratamiento y consumo de unidades monitoras (MU), lo que también puede disminuir el riesgo de efectos secundarios a largo plazo.

A pesar de sus ventajas, la IMRT presenta desventajas significativas. Una de las principales es la mayor exposición de tejidos sanos a dosis bajas de radiación, lo que aumenta el riesgo de cánceres secundarios. Aunque la técnica es precisa en la distribución de dosis al tumor, la dispersión de radiación en áreas cercanas puede ser problemática a largo plazo, planteando un dilema en la relación riesgo-beneficio. Además, su costo es más elevado que el de técnicas más simples como FiF, lo que limita su accesibilidad para ciertos pacientes y centros de tratamiento.

En lo que respecta a la terapia de protones (IMPT), si bien esta técnica disminuye el riesgo de cánceres secundarios y reduce la dosis en órganos críticos, su principal desventaja es la falta de accesibilidad. Esto se debe a su alto costo y a la necesidad de contar con infraestructura especializada, que no está disponible en la mayoría de los centros de salud. Como resultado, esto eleva los costos del tratamiento y limita el acceso para muchos pacientes.

**Tabla 12***Ventajas y desventajas de las terapias híbridas VMAT+3DCRT*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
VMAT-3DCRT como herramienta para mejorar el tratamiento del cáncer de mama.	(Voyant et al., 2023)	La técnica tradicional proporciona alta disponibilidad y precisión en la entrega de dosis a volúmenes específicos, mejorando la cobertura tumoral y acortando el tiempo de tratamiento, lo que beneficia la comodidad del paciente. Además, reduce las dosis a órganos en riesgo como el corazón y los pulmones, siendo efectiva en casos complejos como la irradiación de ganglios linfáticos. Esta técnica integra las ventajas de diversos enfoques, reduciendo la exposición de los tejidos sanos y el riesgo de toxicidad a largo plazo, especialmente en pacientes con un IMC superior a 23, mayores de 48 años y con tumores de más de 350 cc.	la técnica 3DCRT es menos precisa que VMAT en la entrega de dosis al tumor, lo que puede aumentar la exposición de órganos en riesgo. Es menos efectiva para dosis complejas, como en la irradiación de ganglios. Aunque VMAT disminuye las dosis altas de radiación, también incrementa las dosis bajas en los tejidos sanos, lo que puede aumentar el riesgo de efectos secundarios a largo plazo. Además, VMAT es más compleja en planificación y administración. Combinar ambas técnicas puede ser beneficioso, pero su implementación es complicada y requiere más recursos
Estimación de dosis utilizando un dosímetro de luminiscencia estimulada ópticamente y películas EBT3 para diversas técnicas de tratamiento en un maniquí Alderson Rando y estimación de la incidencia de cáncer secundario en el carcinoma de mama izquierda.	(Sushma et al , 2022)	Los dosímetros OSLD demostraron alta precisión en la medición de dosis en diversas ubicaciones, especialmente en órganos cercanos al volumen objetivo y a distancias mayores del campo irradiado, superando la sensibilidad de las películas EBT3. Además, son reutilizables y permiten múltiples lecturas sin pérdida de precisión. Las dosis medidas por OSLD mostraron desviaciones mínimas respecto al sistema de planificación de tratamiento (TPS), con una diferencia máxima del 1.7%, indicando excelente concordancia. Las técnicas avanzadas como IMRT y VMAT reducen las áreas con dosis altas, aunque aumentan la dosis en órganos fuera del campo, mejorando así la eficiencia del tratamiento.	Las técnicas de tratamiento avanzadas, como VMAT y planes híbridos, pueden aumentar el riesgo de cánceres secundarios, especialmente en pulmón y seno contralateral, debido a dosis elevadas en esos órganos. Las películas EBT3 tienen limitaciones para detectar dosis en órganos distantes del campo de tratamiento, mostrando diferencias de hasta un 10.7% respecto al TPS. Aunque los OSLD son precisos, su respuesta puede verse afectada por la radiación dispersa y la energía del haz, lo que puede resultar en sobre respuestas en ciertos casos.

La técnica tradicional de radioterapia se distingue por su alta disponibilidad y precisión en la entrega de dosis al tejido tumoral, lo que mejora su cobertura. Al reducir la duración de las sesiones, aumenta la comodidad del paciente y disminuye el estrés asociado al tratamiento, favoreciendo así la adherencia al régimen terapéutico.

Además, esta técnica minimiza las dosis de radiación en órganos en riesgo, como el corazón y los pulmones, lo cual es crucial para pacientes con características de riesgo, como un IMC superior a 23, mayores de 48 años o tumores de gran tamaño. Al reducir la exposición a estos órganos vitales, se reduce la probabilidad de efectos secundarios a largo plazo y se mejora la calidad de vida después del tratamiento.

Finalmente, la técnica tradicional se enfoca en la minimización de la toxicidad a largo plazo al combinar diferentes enfoques de radioterapia, protegiendo así la salud general del paciente y asegurando un tratamiento integral que no solo busca eliminar el tumor, sino también preservar el bienestar del paciente a largo plazo.

Por otro lado, los dosímetros OSLD representan un avance significativo en la medición de dosis en radioterapia. Su alta precisión en la medición de dosis en diversas ubicaciones, especialmente en órganos cercanos al volumen objetivo y a distancias mayores del campo irradiado, supera la sensibilidad de las películas EBT3. Esto es crucial para asegurar que las dosis administradas sean las adecuadas, lo que se traduce en un tratamiento más efectivo y seguro.

Las desventajas de la técnica 3DCRT incluyen su menor precisión en la entrega de dosis al tumor, lo que puede resultar en una mayor exposición de los órganos en riesgo y una efectividad reducida para dosis complejas, como la irradiación de ganglios. Por otro lado, aunque la técnica VMAT logra reducir las dosis altas, también incrementa las dosis bajas en los tejidos sanos, lo que puede aumentar el riesgo de efectos secundarios a largo plazo. Además, la planificación y administración de VMAT son más complejas, y la combinación de ambas técnicas, aunque beneficiosa, requiere más recursos y presenta desafíos en su implementación. Asimismo, las técnicas avanzadas como VMAT y los planes híbridos pueden aumentar el riesgo de cánceres

secundarios, especialmente en órganos como los pulmones y la mama contralateral, debido a las dosis elevadas.

**Tabla 13**

*Ventajas y desventajas de las terapias híbridas H-IMRT H-VMAT*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Técnicas de planificación híbrida para el cáncer de mama del lado izquierdo en etapa temprana: análisis de la distribución de dosis y estimación del riesgo relativo de cáncer secundario proyectado.	(Racka et al., 2023)	Las técnicas híbridas de radioterapia, que combinan 3D-CRT con h-VMAT o h-IMRT, mejoran la cobertura del volumen objetivo (PTV) y la precisión del tratamiento. Estas técnicas logran reducir la dosis máxima al corazón en 5 Gy en comparación con 3D-CRT, lo que reduce el riesgo de daños cardíacos, particularmente en pacientes con cáncer de mama izquierdo, además de ofrecer una mejor protección a la arteria coronaria y los pulmones. Además, permiten acortar el tiempo de tratamiento, lo que aumenta la comodidad del paciente. Al minimizar la exposición a dosis altas en órganos vitales, también se reducen los riesgos de efectos secundarios graves, como la fibrosis pulmonar y el daño cardíaco.	La técnica h-VMAT conlleva un mayor riesgo de desarrollar cáncer secundario en comparación con 3D-CRT y h-IMRT, con incrementos del 152% en el pulmón derecho, del 18% en el pulmón izquierdo y del 81% en la mama contralateral. Además, las técnicas híbridas son más complejas y requieren más tiempo de planificación. La h-IMRT genera más unidades de monitor, lo que puede incrementar el tiempo de tratamiento y la radiación dispersa, elevando la dosis en tejidos fuera del campo objetivo. Asimismo, h-VMAT aumenta la dosis baja en órganos como el pulmón izquierdo, incrementando los riesgos a largo plazo.
Investigación dosimétrica de técnicas de planificación FIF, VMAT, IMRT, H-VMAT y H-IMRT en radioterapia del cáncer de mama.	(Saraç et al., 2023)	Las técnicas híbridas, como H-VMAT y H-IMRT, optimizan la distribución de la dosis en el área de tratamiento y disminuyen la exposición de órganos adyacentes, como el corazón y los pulmones, especialmente durante irradiaciones del lado izquierdo. Esto contribuye a reducir los efectos secundarios a largo plazo. Estas técnicas también disminuyen la dosis en la mama y el pulmón contralateral en comparación con el uso individual de VMAT o IMRT, lo que reduce el riesgo de cánceres secundarios. Además, los planes híbridos	Aunque los planes híbridos disminuyen las dosis altas en órganos críticos, también pueden resultar en una mayor exposición de un volumen más amplio de tejido sano a dosis bajas, lo que incrementa el riesgo de efectos secundarios a largo plazo. Además, la complejidad de estas técnicas conlleva un mayor tiempo de preparación y ajuste del plan de tratamiento en comparación con enfoques más sencillos.

Título	Autores	Ventajas	Desventajas
		son más eficientes, ya que requieren menos tiempo y unidades monitoras (MU) que técnicas más complejas como IMRT o VMAT.	
Comparación dosimétrica y radiobiológica de la radioterapia de refuerzo integrada simultánea para el cáncer de mama de lado derecho en estadio temprano entre tres técnicas: IMRT, IMRT híbrida y VMAT híbrida	(Bi et al. 2022)	La IMRT es una técnica avanzada que ofrece una cobertura de dosis precisa en el tumor, reduciendo la exposición del corazón y el pulmón contralateral, y minimizando el riesgo de cáncer secundario. La H-IMRT mejora la calidad de la cobertura y protege mejor los órganos cercanos, siendo más robusta frente a errores de configuración. La H-VMAT se centra en una mayor conformidad y homogeneidad de la dosis, permitiendo una administración más eficiente. Juntas, estas técnicas optimizan el tratamiento del cáncer, mejorando la eficacia y reduciendo los efectos secundarios en tejidos sanos.	La técnica VMAT con arco continuo puede provocar una mayor dispersión de dosis en órganos cercanos, como el cristalino del ojo y la piel, aumentando el riesgo de efectos secundarios. Aunque las técnicas híbridas y VMAT ofrecen ventajas, las dosis recibidas por los pulmones en IMRT y VMAT pueden ser significativas, incrementando el riesgo de toxicidad pulmonar a largo plazo. Además, el uso de un mayor número de unidades de monitor en VMAT e IMRT podría aumentar el riesgo de cánceres secundarios inducidos por la radiación debido a la exposición a dosis bajas en todo el cuerpo.
Enfoque de puntuación integrado para evaluar la calidad del plan de radioterapia para el tratamiento del cáncer de mama	(Balaji Ramasubramanian, 2022) y	<p><b>Field-in-Field (FinF).</b> Reduce significativamente la dosis media a órganos como el corazón, el pulmón ipsilateral y los tejidos normales en comparación con otras técnicas avanzadas.</p> <p><b>H-IMRT (Híbrido de IMRT).</b> Ofrece un buen equilibrio entre reducir las dosis bajas y altas en órganos en riesgo (OAR), minimizando tanto el riesgo de efectos a largo plazo como toxicidades agudas.</p> <p><b>H-VMAT (Híbrido de VMAT).</b> Combina las ventajas de VMAT con una mayor eficiencia en la cobertura del PTV y protección de los OAR</p>	Field-in-Field (FinF) - Aunque protege bien los órganos en riesgo, puede generar dosis más altas en las áreas objetivo del tratamiento, lo que podría afectar la efectividad en el control del tumor.

Las técnicas híbridas de radioterapia, que integran 3D-CRT con H-VMAT o H-IMRT, optimizan la cobertura del volumen objetivo (PTV) y la precisión del tratamiento. Estas metodologías logran reducir la dosis máxima al corazón en 5 Gy en comparación con 3D-CRT, lo

que disminuye el riesgo de daño cardíaco, especialmente en pacientes con cáncer de mama izquierdo, al tiempo que protegen los pulmones y la arteria coronaria. Además, acortan el tiempo de tratamiento, lo que incrementa la comodidad del paciente y minimiza la exposición a dosis altas en órganos vitales, reduciendo así la probabilidad de efectos secundarios graves.

Las técnicas híbridas optimizan la distribución de dosis y reducen la exposición de órganos cercanos, especialmente en irradiaciones del lado izquierdo, minimizando efectos secundarios a largo plazo. Comparadas con el uso individual de VMAT o IMRT, disminuyen la dosis en la mama y el pulmón contralateral, reduciendo el riesgo de cánceres secundarios. Además, tiene mayor eficiencia, ya que necesitan menos tiempo y unidades de monitor en comparación con técnicas más complicadas.

Las desventajas de la técnica H-VMAT incluyen un aumento del riesgo de cáncer secundario en comparación con 3D-CRT y H-IMRT, registrándose incrementos del 152% en el pulmón derecho, del 18% en el izquierdo y del 81% en la mama contralateral. Además, las técnicas híbridas son más complejas y requieren un mayor tiempo de planificación. Por otro lado, la H-IMRT genera un mayor número de unidades de monitor, lo que puede extender la duración del tratamiento y aumentar la radiación dispersa, lo que a su vez incrementa la dosis en los tejidos sanos.

Aunque los planes híbridos logran disminuir las dosis elevadas en órganos críticos, también pueden exponer un mayor volumen de tejido sano a dosis bajas, lo que incrementa el riesgo de efectos secundarios a largo plazo. Además, la técnica VMAT con arco continuo puede provocar una mayor dispersión de la dosis en órganos adyacentes, como el cristalino del ojo y la piel, aumentando así el riesgo de toxicidad pulmonar y de desarrollar cánceres secundarios debido a la exposición a dosis bajas en todo el organismo.

**Tabla 14***Ventajas y desventajas de las terapias híbridas IMRT – VMAT*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Resultado clínico de la radioterapia postoperatoria con técnica de planificación híbrida en el cáncer de mama izquierdo después de cirugía conservadora de mama.	(Wei et al, 2023)	Las técnicas híbridas IMRT y VMAT con "simultaneous integrated boost" (SIB) muestran menores tasas de toxicidad aguda, con la mayoría de las pacientes teniendo dermatitis leve (grado 0-1). Estas técnicas reducen la dosis en el corazón y los pulmones, minimizando el riesgo de toxicidades a largo plazo. Las tasas de supervivencia a tres años (local y sin metástasis) superan el 90%, evidenciando su eficacia en el control del cáncer. Además, el uso de SIB reduce el tiempo total de tratamiento, mejorando la conveniencia para los pacientes.	La planificación y administración del tratamiento con técnicas híbridas requieren mayor habilidad técnica y tiempo, lo que puede aumentar la carga de trabajo del equipo médico y limitar su accesibilidad en centros con menos recursos. Aunque los efectos secundarios agudos son bajos, se necesitan estudios a largo plazo para evaluar el impacto en complicaciones tardías, como fibrosis pulmonar y enfermedades cardíacas. Aunque los resultados iniciales son prometedores, se requieren más estudios con seguimientos más largos para validar la seguridad y eficacia a largo plazo de estas técnicas.

Las técnicas híbridas de IMRT y VMAT que emplean "simultaneous integrated boost" (SIB) brindan significativas ventajas en el tratamiento del cáncer. Estas metodologías muestran tasas reducidas de toxicidad aguda, con la mayoría de las pacientes experimentando solo dermatitis leve (grado 0-1). Además, disminuyen la radiación en órganos críticos como el corazón y los pulmones, lo que contribuye a minimizar el riesgo de toxicidades a largo plazo, como enfermedades cardíacas.

Los resultados clínicos son alentadores, con tasas de supervivencia a tres años que superan el 90%, lo que demuestra su efectividad en el control del cáncer. Además, la implementación de SIB reduce el tiempo total de tratamiento, lo que mejora la comodidad para las pacientes y optimiza la eficiencia del proceso. En conjunto, estas técnicas constituyen una opción segura y eficaz para el tratamiento del cáncer.

La implementación de técnicas híbridas como IMRT y VMAT con "*simultaneous integrated boost*" (SIB) presenta desventajas significativas. Su planificación y administración requieren

mayor habilidad técnica y tiempo, aumentando la carga de trabajo del equipo médico y limitando el acceso en centros con menos recursos.

A pesar de que los efectos secundarios agudos son bajos, es esencial realizar estudios a largo plazo para evaluar complicaciones tardías, como fibrosis pulmonar y enfermedades cardíacas. Además, aunque los resultados iniciales son prometedores, se necesita más investigación con seguimientos prolongados para confirmar su seguridad y eficacia, lo que subraya la necesidad de cautela en su adopción generalizada.

**Tabla 15**

*Ventajas y desventajas de las terapias híbridas IMRT+3DCRT – IMRT+VMAT*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Investigación del efecto de técnicas híbridas creadas con radioterapia de intensidad modulada sobre la calidad del plan en radioterapia del cáncer de mama.	(Sultan et al, 2023)	La integración de IMRT con 3DCRT o VMAT optimiza la distribución de la dosis, minimizando la exposición a la radiación en los tejidos sanos sin comprometer la eficacia en el tratamiento del tumor. Las técnicas híbridas, en particular IMRT+3DCRT, logran reducir la dosis en órganos críticos como el corazón y los pulmones, lo que disminuye los efectos secundarios. Por otro lado, IMRT+VMAT proporciona la mejor conformidad y homogeneidad de la dosis, mejorando así la efectividad del tratamiento.	Las técnicas híbridas demandan una planificación cuidadosa y equilibrada entre diferentes modalidades, lo que complica el proceso de tratamiento. Además, algunas técnicas como VMAT pueden exponer más tejido sano a dosis bajas de radiación, a pesar de que los planes híbridos buscan mitigar este riesgo.

La combinación de IMRT con 3DCRT o VMAT mejora la distribución de la dosis de radiación, protegiendo los tejidos sanos y garantizando la eficacia en el tratamiento del tumor. Específicamente, la asociación de IMRT con 3DCRT resulta eficaz para disminuir la dosis en órganos críticos como el corazón y los pulmones, lo que ayuda a reducir los efectos secundarios. Por otro lado, la fusión de IMRT con VMAT maximiza la conformidad y homogeneidad de la dosis, lo que a su vez potencia la efectividad del tratamiento.

Las técnicas híbridas de radioterapia requieren una planificación minuciosa, lo que puede complicar el proceso de tratamiento. A pesar de los esfuerzos por mitigar los riesgos, algunas

modalidades, como VMAT, aún pueden exponer tejido sano a dosis bajas de radiación, lo que plantea un desafío adicional en la protección de la salud del paciente.

**Tabla 16**

*Ventajas y desventajas de las terapias híbridas DFB-FiF (Field in Field de haz aplanado dinámicamente).*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Método eficiente para la radioterapia de mama completa utilizando aceleradores lineales Halcyon	Tsai et al., 2023	Optimiza la dosis en órganos en riesgo (OARs) y mejora la homogeneidad de la dosis, especialmente en tumores mamarios grandes. También ofrece una solución práctica que reduce la dependencia de la habilidad del planificador, aumentando la eficiencia en la creación de planos de tratamiento y disminuyendo la necesidad de imágenes redundantes de tomografía computarizada de haz cónico (CBCT).	El método híbrido puede resultar en un aumento de la dosis recibida por el corazón debido a la optimización del componente IMRT, aunque se mantiene dentro de límites aceptables. Además, el uso de un haz de 6 MV sin filtro aplanador puede restringir la aplicación de técnicas convencionales como FiF y radioterapia en 2D. Por último, la necesidad de ajustar los pesos entre el plan basal y el plan IMRT puede ser un desafío, requiriendo un equilibrio entre la cobertura del volumen objetivo y la homogeneidad.

El método propuesto ofrece una notable velocidad, siendo hasta 6.5 veces más rápido que técnicas convencionales como el DFB-FiF, sin comprometer la cobertura del volumen objetivo ni la homogeneidad de la dosis. Además, mejora la dosis en órganos en riesgo, especialmente en tumores mamarios grandes, y reduce la dependencia de la habilidad del planificador, lo que optimiza la creación de planes de tratamiento y disminuye la necesidad de imágenes redundantes de CBCT.

El método híbrido tiene desventajas que deben considerarse. Puede aumentar la dosis de radiación al corazón, aunque dentro de límites aceptables, lo que plantea preocupaciones de seguridad a largo plazo. Además, el uso de un haz de 6 MV sin filtro aplanador limita la compatibilidad con técnicas convencionales. Por último, ajustar los pesos entre el plan basal y el IMRT añade complejidad a la planificación, dificultando el equilibrio entre la cobertura del

volumen objetivo y la homogeneidad de la dosis. Estas desventajas requieren atención cuidadosa para maximizar la efectividad y seguridad del tratamiento.

**Tabla 17**

*Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: radioterapia híbrida de intensidad modulada (HYI) – Terapia híbrida de arco volumétrico modulado (HYV) y arco reducido VMAT (BT).*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Comparación de técnicas de dosimetría de mama completa: de 3DCRT a VMAT y el impacto en el corazón y los tejidos circundantes.	Lamprecht et al, 2022	Las técnicas VMAT y bowtie (BT) proporcionan una mejor conformidad de la dosis en comparación con 3DCRT, lo que ayuda a proteger los órganos en riesgo. En pacientes con cáncer de mama en el lado izquierdo, estas técnicas reducen significativamente la radiación recibida por el corazón, lo que disminuye el riesgo de enfermedades cardíacas. Además, tanto BT como BTFFF disminuyen la dosis en los pulmones ipsilaterales y permiten tiempos de tratamiento más rápidos, beneficiando a aquellos que requieren "inspiración profunda en apnea" (DIBH).	Las técnicas BT y BTFFF pueden aumentar la dosis en los tejidos contralaterales, como el pulmón y la mama opuesta al tumor, lo que incrementa el riesgo de efectos secundarios en estas áreas. Además, requieren más unidades monitoras (MU) y segmentos de planificación, aumentando la complejidad y el tiempo de preparación del tratamiento. También existe un riesgo elevado de malignidades secundarias debido a la mayor exposición a la radiación en el cuerpo al utilizar estas técnicas avanzadas.

Las técnicas VMAT y bowtie (BT) mejoran la radioterapia, particularmente en el tratamiento del cáncer de mama en el lado izquierdo. Estas metodologías ofrecen una mayor conformidad en la distribución de la dosis, protegiendo de manera efectiva órganos en riesgo como el corazón y los pulmones, lo que contribuye a disminuir el riesgo de enfermedades cardíacas y efectos secundarios respiratorios. Además, la variante BTFFF, que no utiliza filtro de aplanamiento, permite tiempos de tratamiento más cortos, lo que resulta beneficioso para los pacientes que requieren técnicas específicas de respiración. Estas innovaciones optimizan tanto la eficacia como la seguridad del tratamiento.

Las desventajas de las técnicas avanzadas de radioterapia, como BT y BTFFF. Aunque son efectivas, incrementan la dosis en tejidos sanos contralaterales, lo que puede generar efectos

secundarios. Además, requieren más unidades monitoras (MU), aumentando la complejidad y el tiempo de planificación. Finalmente, su utilización se relaciona con un incremento en el riesgo de desarrollar cánceres secundarios debido a la mayor exposición a la radiación, lo que genera inquietudes acerca de su seguridad a largo plazo. Estas desventajas resaltan la importancia de realizar una evaluación minuciosa del equilibrio entre los beneficios y los riesgos involucrados.

**Tabla 18**

*Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: 3DCRT+VMAT – IMR+VMAT – 3DCRT FIF*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Comparación dosimétrica entre técnicas de planificación de radioterapia para el cáncer de mama izquierda	Domingo et al, 2023	<p>3D-CRT (FILTRO Y FIF)</p> <p>Reducir las dosis en órganos de riesgo, como el corazón y los pulmones; ofrece beneficios significativos en la reducción de la exposición: la a técnica FIF proporciona mayor homogeneidad.</p> <p>IMRT y VMAT</p> <p>Mejoran la cobertura y conformidad de la dosis en el volumen; ofrecen una distribución de dosis más homogénea en comparación; la técnica VMATMOD ayuda a minimizar la exposición a la radiación en órganos críticos como el corazón.</p>	<p>Las técnicas 3D-CRT, IMRT y VMAT presentan desventajas que afectan su eficacia y seguridad en el tratamiento. 3D-CRT ofrece una cobertura inferior del volumen objetivo y enfrenta dificultades para lograr una adecuada conformidad en la distribución de la dosis. Por otro lado, IMRT y VMAT, aunque mejoran la conformidad y cobertura, incrementan la dosis en órganos cercanos, como el pulmón contralateral y el corazón, lo que eleva el riesgo de toxicidades a largo plazo. Además, estas técnicas son más complejas y requieren más tiempo para su planificación y optimización.</p>

Las técnicas 3D-CRT, IMRT y VMAT presentan una serie de ventajas que mejoran significativamente la seguridad y eficacia del tratamiento oncológico. En particular, 3D-CRT, mediante el uso de filtros y FIF, destaca por su capacidad para reducir la exposición de órganos de riesgo, como el corazón y los pulmones, lo que minimiza el riesgo de toxicidades y complicaciones a largo plazo. Además, su técnica FIF proporciona una distribución más homogénea de la dosis.

Por otro lado, las técnicas IMRT y VMAT proporcionan una cobertura y conformidad de dosis superiores en el volumen objetivo planificado (PTV), asegurando una administración precisa del tratamiento. Además, mejoran la homogeneidad de la distribución de la dosis en comparación con

los métodos convencionales, lo que potencia la eficacia en la destrucción del tumor. En particular, la técnica VMATMOD se distingue por su habilidad para disminuir la exposición a la radiación en órganos críticos, ofreciendo así un nivel adicional de protección para el paciente.

En cuanto a las ventajas de las técnicas de radioterapia 3D-CRT, IMRT y VMAT. Mientras que 3D-CRT tiene una cobertura del volumen objetivo y conformidad en la dosis inferior, las técnicas más avanzadas, IMRT y VMAT, ofrecen mejores resultados en esos aspectos. Sin embargo, un cambio, estas últimas aumentan la dosis en órganos cercanos, como el pulmón y el corazón, lo que puede conducir a efectos secundarios a largo plazo. Además, la complejidad y el tiempo necesario para planificar y optimizar IMRT y VMAT son mayores, lo que podría complicar su implementación en entornos clínicos.

**Tabla 19**

*Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: intensity-modulated radiation therapy (fIMRT)*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Vector de refuerzo de mama: una nueva métrica propuesta para optimizar la localización del isocentro en una técnica híbrida fIMRT-VMAT para un impulso integrado simultáneo en radioterapia de mama	De La Llana et al, 2020	Colocar el isocentro en el centro de masa del "boost" mejora la cobertura del volumen de tratamiento, especialmente cuando la distancia entre ambos centros supera los 5 cm. La técnica SIB (simultaneous integrated boost) reduce las visitas al departamento de radioterapia al combinar la irradiación de la mama y el "boost" en una sola sesión. Además, la combinación de fIMRT y VMAT optimiza la conformación de la dosis al tejido tumoral, minimizando la exposición de los tejidos sanos. Por último, la técnica híbrida permite ajustar el isocentro para mejorar la entrega de dosis y la cobertura del volumen tumoral según la anatomía del paciente.	La técnica requiere una planificación más compleja, lo que puede aumentar el tiempo necesario para preparar el tratamiento. - Aunque el boost mejora la conformidad, en algunos casos puede haber variaciones en la homogeneidad de la dosis, lo que podría requerir ajustes adicionales.

Colocar el isocentro en el centro de masa del "boost" y utilizar la técnica SIB optimiza la cobertura del tratamiento y reduce las visitas al departamento de radioterapia al combinar la irradiación de la mama y el "boost". La fIMRT y VMAT mejoran la conformación de la dosis al

tumor, protegiendo los tejidos sanos, en cambio, la configuración del isocentro en técnicas híbridas facilita una administración más precisa de la dosis, adaptándose a la anatomía del paciente.

La técnica, aunque efectiva, implica un proceso de planificación que puede ser complicado y consumir más tiempo, lo que puede ser un desafío en entornos con recursos limitados. Además, aunque el "boost" mejora la conformidad del tratamiento, la posibilidad de variaciones en la homogeneidad de la dosis sugiere que no siempre se logra la precisión deseada, lo que puede requerir ajustes adicionales garantizando la seguridad y eficacia en el tratamiento. Esto subraya la importancia de un enfoque cuidadoso y adaptativo en la administración de tratamientos de radioterapia.

### Tabla 20

*Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: tIMRT - tVMAT*

Título	Autores	Ventajas	Desventajas
Estudio comparativo dosimétrico de 3DCRT, IMRT, VMAT, Ecomp, y Técnicas híbridas para la radioterapia mamaria	Chen et al, 2020	Técnicas con campos tangenciales (como 3DCRT, 3DFIF, tIMRT, Ecomp, y Hybrid): producen una mejor dosimetría en órganos de riesgo (OARs), como el corazón y los pulmones; técnicas como Ecomp proporcionan una buena homogeneidad en la dosis dentro del volumen objetivo planificado (PTV), lo que ayuda a reducir el riesgo de toxicidades agudas, como las reacciones cutáneas. tIMRT y Hybrid mejoran la cobertura del volumen objetivo (PTV) sin aumentar significativamente la dosis en órganos de riesgo, ofreciendo un equilibrio entre eficiencia y protección de órganos cercanos	IMRT MF5 y tVMAT: - Estas técnicas generan dosis más altas en los pulmones ipsilaterales y contralaterales, así como en el corazón, lo que aumenta el riesgo de complicaciones pulmonares y cardíacas. - IMRT MF5 requiere más tiempo de planificación y más unidades de monitor (MU), lo que puede afectar la eficiencia del tratamiento y el tiempo de entrega. - tVMAT, aunque tiene menos unidades de monitor que IMRT MF5, también tiende a exponer más tejido normal a dosis bajas, aumentando el riesgo de desarrollar cánceres secundarios

Las técnicas de radioterapia que utilizan campos tangenciales, como 3DCRT, 3DFIF, tIMRT, Ecomp y Hybrid, son ventajosas para la dosimetría de órganos de riesgo (OARs) como el corazón y los pulmones, lo que es crucial para minimizar la toxicidad en estos tejidos vulnerables. En particular, Ecomp destaca por su capacidad para lograr una buena homogeneidad de dosis dentro

del volumen objetivo planificado (PTV), lo que ayuda a mitigar los efectos secundarios agudos, como las reacciones cutáneas. Además, tanto tIMRT como Hybrid mejoran la cobertura del PTV sin aumentar significativamente la dosis en los órganos en riesgo, lo que permite un tratamiento más eficiente y seguro. Esto sugiere que estas técnicas avanzadas marcan un importante progreso en la radioterapia, al equilibrar la efectividad del tratamiento con la protección de los tejidos sanos.

Las técnicas IMRT MF5 y tVMAT presentan desventajas significativas en el tratamiento radioterapéutico, ya que generan dosis elevadas en los pulmones y el corazón, lo que incrementa el riesgo de complicaciones pulmonares y cardíacas. Además, IMRT MF5 implica una planificación más compleja, que requiere más tiempo y unidades de monitor (MU), afectando la eficiencia y el tiempo de entrega del tratamiento. Por otro lado, aunque tVMAT requiere menos unidades de monitor, su tendencia a exponer más tejido normal a dosis bajas puede aumentar la probabilidad de desarrollar cánceres secundarios a largo plazo.

**Tabla 21**

*Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: VMAT combinado – terapia convencional de campo tangencial*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Arco voltoterapéutico híbrido modulado volumétricamente para el cáncer de mama postoperatorio, incluidos los ganglios linfáticos regionales: la ventaja de los datos dosimétricos y la seguridad de las toxicidades	Doi et al, 2020	La técnica Hybrid VMAT ofrece una distribución de dosis más precisa y un mejor índice de homogeneidad y conformidad que 3DCRT, manteniendo la irradiación a tejidos sanos relativamente baja y reduciendo así la probabilidad de efectos adversos. Durante el seguimiento, no se reportaron casos graves de toxicidad aguda ni neumonitis significativa, indicando que es una técnica segura. Además, para pacientes con tumores del lado izquierdo, las dosis al corazón fueron comparables entre Hybrid VMAT y 3DCRT, lo cual es importante para prevenir complicaciones cardíacas.	Hybrid VMAT presenta un aumento significativo en la dosis irradiada al pulmón contralateral y al esófago en comparación con 3DCRT, lo que puede elevar el riesgo de complicaciones a largo plazo, como la esofagitis leve. Además, su planificación y administración son más complejas y requieren mayor precisión, lo que podría ser un desafío para centros con recursos tecnológicos limitados.

La técnica Hybrid VMAT destaca por su capacidad para ofrecer una distribución de dosis más precisa y homogénea en comparación con 3DCRT, lo que es fundamental para el tratamiento efectivo del cáncer mientras se minimizan los riesgos para los órganos sanos cercanos. Al mantener la irradiación en estos tejidos en niveles bajos, se reduce la posibilidad de efectos secundarios adversos, lo que es particularmente relevante dado que no se registraron casos graves de toxicidad aguda durante el seguimiento. Hybrid VMAT es una opción segura y eficaz para los pacientes, especialmente aquellos con tumores en el lado izquierdo, donde la protección del corazón es crucial para evitar complicaciones a largo plazo. En general, esta técnica combina eficacia en el tratamiento con un enfoque en la seguridad del paciente.

La técnica Hybrid VMAT, aunque ofrece beneficios en términos de homogeneidad y conformidad de la dosis, también presenta desventajas importantes. El incremento de la dosis irradiada al pulmón contralateral y al esófago sugiere un potencial aumento en el riesgo de complicaciones a largo plazo, como enfermedades pulmonares o esofagitis. Además, la complejidad en su planificación y administración puede ser un obstáculo, especialmente en centros con recursos limitados, lo que podría afectar la accesibilidad y la efectividad de esta técnica en ciertos entornos clínicos.

**Tabla 22**

*Ventajas y desventajas de las terapias híbridas: 3D-CRT/IMRT (radioterapia conformada tridimensional/intensidad modulada)*

<b>Título</b>	<b>Autores</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
---------------	----------------	-----------------	--------------------

<p>Comparación dosimétrica de intensidad modulada Radioterapia, Arco Volumétrico Modulado y Radioterapia Conformada Tridimensional Híbrida/Radioterapia de Intensidad Modulada Técnicas para el cáncer de mama derecho</p>	<p>Liu et al. (2020)</p>	<p>Las técnicas de radioterapia volumétrica modulada en arco (VMAT) y la terapia híbrida 3D-CRT/IMRT ofrecen una mejor cobertura del área objetivo, optimizando la dosis en el tumor y minimizando la exposición a tejidos sanos. La técnica híbrida 3D-CRT/IMRT reduce la dosis al corazón, disminuyendo el riesgo de complicaciones cardíacas a largo plazo. Por su parte, VMAT con arco continuo proporciona la dosis promedio más baja en el pulmón ipsilateral, lo que reduce el riesgo de neumonía por radiación, y también disminuye la dosis en la mama contralateral, reduciendo el riesgo de cáncer de mama secundario. Además, VMAT permite tiempos de tratamiento más rápidos, mejorando la comodidad del paciente y minimizando el riesgo de movimiento durante la terapia.</p>	<p>VMAT con arco continuo puede provocar una mayor dispersión de dosis en órganos cercanos, como el cristalino y la piel, elevando el riesgo de efectos secundarios. A pesar de las ventajas de las técnicas híbridas y VMAT, las dosis recibidas por los pulmones en IMRT y VMAT pueden ser significativas, aumentando el riesgo de toxicidad pulmonar a largo plazo. Además, el uso de un mayor número de unidades de monitor (MU) en VMAT e IMRT podría incrementar el riesgo de cánceres secundarios inducidos por la radiación debido a la exposición a dosis bajas en todo el cuerpo.</p>
--	--------------------------	--	---

Las técnicas de radioterapia volumétrica modulada en arco (VMAT) y la terapia híbrida 3D-CRT/IMRT son avanzadas y efectivas para el tratamiento de tumores, ya que aseguran que la dosis de radiación se dirija de manera precisa al área afectada. Esto no solo maximiza la efectividad del tratamiento en el tumor, sino que también protege los tejidos sanos circundantes. En particular, la técnica híbrida es destacable por reducir la exposición del corazón a la radiación, lo que es fundamental para prevenir complicaciones.

Además, el uso de VMAT, especialmente con arco continuo, se traduce en beneficios adicionales, como una menor dosis en el pulmón ipsilateral, lo que ayuda a disminuir el riesgo de neumonía por radiación. También se observa que se reduce la dosis en la mama contralateral, lo que contribuye a minimizar el riesgo de desarrollar cáncer de mama secundario debido a la radiación. Por último, la rapidez de la técnica VMAT no solo mejora la experiencia del paciente, sino que también disminuye la probabilidad de que el movimiento del paciente durante el

tratamiento afecte los resultados. En conjunto, estas características hacen que estas técnicas sean altamente efectivas y seguras en la práctica clínica.

La información sugiere que, aunque la técnica VMAT con arco continuo y las técnicas híbridas ofrecen beneficios en términos de cobertura y precisión del tratamiento, también presentan riesgos significativos. La dispersión de dosis en órganos cercanos, como el cristalino y la piel, puede incrementar la probabilidad de efectos secundarios, lo que es preocupante para la salud a largo plazo. Además, las dosis administradas a los pulmones en IMRT y VMAT son considerablemente altas, lo que puede conllevar a toxicidades pulmonares. También se destaca que el uso de un mayor número de unidades de monitor (MU) en estas técnicas puede elevar el riesgo de desarrollar cánceres secundarios debido a la exposición continua a dosis bajas de radiación.

### **2.3. Cartilla educativa: comparación de técnicas híbridas vs técnica VMAT en el tratamiento del cáncer de mama**

Esta cartilla educativa aborda el cáncer de mama como un problema de salud pública, especialmente en Colombia, donde su incidencia y mortalidad han aumentado recientemente. Con énfasis en la radioterapia, la cartilla compara dos técnicas avanzadas: la Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT) y las técnicas híbridas, analizando su eficacia, fundamentos técnicos, beneficios clínicos e impacto en la calidad de vida del paciente.

Inicia con una introducción al cáncer de mama, sus tipos, etapas y factores de riesgo, como la edad, antecedentes familiares, factores reproductivos, hormonales y estilo de vida. También presenta estadísticas que destacan la necesidad de mejorar el acceso a tratamientos avanzados en Colombia, como VMAT y técnicas híbridas.

Luego, describe los principios de la radioterapia, el uso de radiación ionizante para destruir células cancerosas, la importancia de la planificación del tratamiento y el fraccionamiento de dosis. Explica diferentes técnicas de radioterapia (3D-CRT, IMRT, VMAT y técnicas híbridas), destacando la precisión y rapidez de VMAT y la flexibilidad de las técnicas híbridas para adaptarse a cada paciente.

La cartilla compara detalladamente VMAT y las técnicas híbridas en términos de dosimetría, distribución de dosis, protección de órganos en riesgo y efectos secundarios. Analiza la capacidad de VMAT para reducir toxicidad aguda y las ventajas de las técnicas híbridas en la minimización de toxicidad crónica. También evalúa los costos y la comodidad de cada técnica, subrayando la rapidez de VMAT.

Finalmente, revisa investigaciones sobre la eficacia clínica de ambas técnicas en la reducción del tumor, la supervivencia y la calidad de vida del paciente, enfatizando la protección de órganos como el corazón y los pulmones durante el tratamiento.

En definitiva, esta cartilla es una guía integral sobre el uso de VMAT y técnicas híbridas en el tratamiento del cáncer de mama, orientada a informar a profesionales y pacientes sobre tecnologías avanzadas de radioterapia para decisiones terapéuticas más personalizadas y efectivas.

## **2.4. Discusión**

El estudio evaluó la efectividad de las técnicas híbridas y VMAT en el tratamiento del cáncer de mama, analizando un total de 30 artículos científicos. La mayoría de los documentos fueron obtenidos de Google Académico (20), seguidos de Scielo (9) y Lilacs (1). Los estudios fueron principalmente de origen chino, turco, australiano e indio, con una representación menor de países como Alemania, Brasil, Polonia, Rusia y Estados Unidos. El inglés fue el idioma predominante, seguido del portugués. El año 2023 se destacó como el periodo con mayor número de publicaciones, centradas en terapias como VMAT, HVMAT y H-IMRT. Además, se observó que tanto las técnicas híbridas como VMAT han mostrado resultados positivos en el tratamiento del cáncer de mama; sin embargo, es esencial continuar investigando para enriquecer los referentes bibliográficos.

Asimismo, se examinaron las ventajas y desventajas de las terapias híbridas, centrándose especialmente en la terapia VMAT. En el contexto de la radioterapia para el tratamiento del cáncer de mama, se destaca su capacidad para reducir la dosis de radiación en órganos adyacentes, como

el corazón, los pulmones y las arterias. Esto contribuye a disminuir considerablemente el riesgo de toxicidad, neumonitis por radiación y complicaciones coronarias graves (Bonaccorsi et al., 2024). Esta información concuerda con los hallazgos de Jianian et al. (2021), que subrayan la minimización de la dosis recibida por el corazón durante el tratamiento.

De la misma manera se abordó las ventajas y desventajas de las terapias híbridas, en el caso en particular la terapia VMAT, las ventajas en la radioterapia para el tratamiento de cáncer de mama, se resalta la reducción de la dosis de radiación a órganos cercanos como el corazón, pulmones y arterias, además, reduciendo considerablemente el riesgo de toxicidad, neumonitis por radiación y complicaciones coronarias graves (Bonaccorsi et al, 2024), dicha información coincide con los hallazgos de Jianian et. al (2021), al enfocarse en que se minimiza la dosis recibida por el corazón durante el tratamiento.

Asimismo, el uso de partículas como los bolos virtuales mejora la cobertura del volumen blanco planificado y elimina la necesidad de bolos físicos, aumentando la comodidad del paciente y reduciendo la variabilidad en la dosimetría (Ugurlu et. al, 2022). Estos beneficios hacen de VMAT una opción altamente eficiente, segura y efectiva para el tratamiento del cáncer de mama, mejorando tanto la protección de órganos como la experiencia del paciente.

A pesar de los aspectos positivos, surgen algunas desventajas, es así como VMAT, está relacionado con el alto costo de estas tecnologías que limita la disponibilidad en algunas instituciones de salud (Bonaccorsi et al, 2024), unido a ello, el uso de múltiples haces para lograr la cobertura óptima del tumor puede extender el tiempo de tratamiento, impactando directamente en la comodidad del paciente como en la eficiencia del proceso (Yipeng, 2023). Además, la implementación de este tipo de tecnologías requiere de un equipo especializado y formación para el manejo, siendo una barrera significativa para brindar una atención especializada.

Otra terapia híbrida que se abordó fue H-VMAT, los resultados obtenidos resaltan una de las ventajas la mejora de la cobertura y la conformación de la radiación (Zhang et al., 2023), ya que asegura una administración precisa y eficiente de la dosis respectiva, reduciendo la exposición a

órganos críticos más cercanos como lo es el corazón y los pulmones, es decir, minimizando los efectos secundarios y disminuyendo el riesgo de cáncer secundario (Domingos et al, 2024).

Además, esta técnica resalta la disminución de la dosis en tejidos sanos, lo que permite una distribución más efectiva de la radiación sin comprometer la cobertura del tumor (Venjakob et al., 2021). En definitiva, esta terapia híbrida ofrece una mayor precisión en el tratamiento, lo que contribuye a reducir los efectos secundarios y a mejorar la calidad de vida de los pacientes que se someten a este tipo de terapia.

En cuanto a las desventajas de la terapia H-VMAT, el incremento de la dosis en los distintos órganos de riesgo como el pulmón ipsilateral incrementa el riesgo de toxicidad (Domingos et al, 2024), además, se requiere de más recursos y mayor precisión de la técnica haciéndolos más complejos y difíciles de implementar con respecto a las técnicas tradicionales. Asimismo, el hecho de que estas técnicas ofrecen mejor cobertura del volumen tumoral, generan irradiaciones de dosis bajas en órganos no objetivos, influyendo en el riesgo de cánceres secundarios (Venjakob et al, 2021).

De igual modo, se hace referencia a la terapia híbrida: arcos clásicos (cVMAT), arcos tangenciales (tVMAT) y arcos divididos (spVMAT), una ventaja está determinada por la reducción significativa de la dosis de radiación en órganos críticos como el corazón y los pulmones, minimizando el riesgo de efectos secundarios graves, unido a ello mejora la precisión del tratamiento, por tal motivo se considera una técnica de radioterapia moderna que contribuye a la protección de los órganos vitales, mejorar la seguridad y eficacia. Asimismo, una desventaja está relacionada con el mayor tiempo y recursos técnicos, como el uso elevado de unidades monitor y los tiempos de irradiación más largos que prolongan la duración del tratamiento (Prokófev y Salim, 2024).

Desde otra perspectiva, se destaca la terapia híbrida JO-VMAT, tVMAT, cuya ventaja radica en su capacidad para ajustar la distribución de la dosis de radiación, centrando la energía en el tumor y disminuyendo la irradiación de los tejidos sanos. Esta característica es especialmente crucial para proteger órganos vitales como el corazón, los pulmones y la mama contralateral, lo

que contribuye a reducir el riesgo de efectos secundarios a largo plazo, como enfermedades cardíacas o cánceres secundarios. En particular, para pacientes jóvenes o con una alta expectativa de vida, esta técnica puede mejorar la calidad de vida al minimizar la exposición innecesaria a la radiación (Zhang et al., 2024).

Sin embargo, una desventaja importante es la complejidad de su planificación, que exige un enfoque más detallado y personalizado en comparación con los métodos convencionales (Zhang et al., 2024). Por ello, su uso debe basarse en una evaluación cuidadosa del paciente, considerando tanto sus beneficios como las limitaciones que pueda conllevar.

En relación con la terapia híbrida H-IMRT, se destaca su habilidad para reducir la radiación en los órganos adyacentes al área de tratamiento, lo que minimiza la exposición innecesaria de los tejidos sanos y disminuye el riesgo de efectos secundarios a largo plazo. Además, esta técnica acelera el proceso de tratamiento, mejorando la comodidad del paciente y reduciendo la exposición total a la radiación, lo cual es particularmente ventajoso para aquellos que necesitan múltiples sesiones (Subhas et al., 2023).

En contraste, la técnica de Campos Fijos en 3D (FiF) es rápida y fácil de implementar, pero presenta limitaciones en precisión y distribución de dosis, lo que puede aumentar la exposición de órganos en riesgo y comprometer la seguridad a largo plazo (Haldar et al., 2023). Aunque eficiente en términos de tiempo, esta técnica puede resultar menos favorable en contextos donde la precisión no es constante.

A pesar de que la terapia de protones (IMPT) ofrece beneficios considerables en la reducción de riesgos, su elevado costo y la necesidad de infraestructura especializada pueden limitar su accesibilidad en numerosos centros (Santos et al., 2021). Por lo tanto, la selección de la técnica más apropiada debe realizarse mediante una evaluación exhaustiva de las características del paciente, considerando tanto las ventajas como las desventajas de cada terapia.

En relación con la terapia híbrida VMAT+3DCRT, una de sus principales ventajas es la reducción en la duración de las sesiones, lo que mejora la comodidad del paciente y disminuye el

estrés asociado con el tratamiento (Voyant et al., 2023). Esta técnica también logra disminuir la dosis de radiación en órganos críticos, como el corazón y los pulmones, lo que reduce el riesgo de efectos secundarios a largo plazo. No obstante, existen desventajas significativas, como una mayor exposición en órganos de riesgo y su menor efectividad para dosis complejas, como en la irradiación de ganglios (Sushma et al., 2022). Es importante destacar que, aunque estas técnicas avanzadas reducen las dosis altas, pueden aumentar la exposición a dosis bajas en tejidos sanos.

Las técnicas híbridas de radioterapia H-IMRT y H-VMAT, se ha considerado que una de las ventajas está en la reducción de la dosis máxima al corazón, lo cual minimiza el riesgo de daño cardíaco, especialmente en pacientes con cáncer de mama izquierda (Racka et al., 2023). Además, esta protección se extiende a órganos vitales como los pulmones y la arteria coronaria, porque acorta el tiempo de tratamiento, incrementando la comodidad del paciente y minimizando la exposición a dosis elevadas (Saraç et al., 2023). Asimismo, se ha considera que estas técnicas híbridas limitan la exposición de organos cercanos, siendo efectivas en irradiaciones del lado izquierdo, dismiuyen la dosis en la mama y el pulmón contralateral, reduciendo el riesgo de cánceres secuendarios (Bi et al. 2022). De igual manera, se presentan algunas desventajas significativas como el requerimiento de un tiempo de planificación mayor, prolongando el tratamiento, incrementando la radiación dispensa y la dosis en tejidos sanos (Balaji y Ramasubramanian, 2022).

Las terapias híbridas IMRT-VMAT presentan tasas reducidas de toxicidad aguda, con la mayoría de los pacientes experimentando solo dermatitis leve (grado 0-1). Además, estas técnicas disminuyen la dosis de radiación en órganos críticos como el corazón y los pulmones, lo que contribuye a minimizar el riesgo de toxicidades a largo plazo, incluidas enfermedades cardíacas (Wei et al., 2023). No obstante, la implementación de estas metodologías requiere habilidades técnicas avanzadas y un mayor tiempo de planificación, lo que puede incrementar la carga de trabajo del equipo médico y limitar el acceso en centros con recursos más limitados.

En cuanto a las terapias híbridas IMRT+3DCRT e IMRT+VMAT, sus principales ventajas radican en la optimización de la distribución de la dosis de radiación, lo que asegura la eficacia en el tratamiento del tumor mientras protege los tejidos sanos. Esto se traduce en una reducción de la

dosis en órganos críticos como el corazón y los pulmones, lo que disminuye los efectos secundarios asociados con el tratamiento. No obstante, también existen desventajas, como la exposición de tejidos sanos a dosis bajas de radiación (Sultan et al., 2023), lo que implica la necesidad de una planificación cuidadosa para el tratamiento a seguir.

En cuanto a las terapias híbridas DFB-FiF (Field in Field de haz aplanado dinámicamente), una de las ventajas está en la mejora la dosis a órgano en riesgo, siendo beneficioso para tumores mamarios grandes. Sin embargo, presentan desventajas como el aumento de dosis de radiación al corazón, lo que genera preocupación por la seguridad a largo plazo (Tsai et al., 2023), por lo que se considera que deben tenerse una planificación para considerar la realización de este tratamiento.

Desde otra perspectiva, se hace énfasis en la radioterapia híbrida de intensidad modulada (HYI) – Terapia híbrida de arco volumétrico modulado (HYV) y arco reducido VMAT (BT), una de las ventajas está en que mejoran la conformidad de la dosis, protegiendo órganos en riesgo como el corazón y los pulmones, reduciendo el riesgo de enfermedades cardíacas y efectos secundarios respiratorios (Lamprecht et al, 2022). Aunque también presentan desventajas, como incremento de la dosis en tejidos sanos contralaterales, conllevando a efectos secundarios, asociando a mayor riesgo de cánceres secundarios.

En las terapias híbridas: 3DCRT+VMAT – IMR+VMAT – 3DCRT FIF, la principal ventaja está en reducción de la exposición de órganos de riesgo como el corazón y los pulmones, además, se reduce el tiempo de tratamiento y se mejora la homogeneidad de la dosis y la exposición a la radiación de órganos críticos. La desventaja está en que se debe aumentar la dosis en órganos cercanos, llevando a riesgo potencial de efectos secundarios a largo plazo (Domingo et al, 2023). Por lo tanto, la elección de la terapia debe estar relacionada con las características del tumor, la localización y el estado general del paciente.

En la terapia *intensity-modulated radiation therapy* (fIMRT), esta técnica ha demostrado mejorar la conformación de la dosis del tumor, permitiendo una entrega precisa y controlada de la radiación, es decir, que se considera relevante en el tratamiento de cáncer de mama, donde los órganos críticos como el corazón y los pulmones están próximos al área objetivo. Sin embargo, la

desventaja está en la personalización del tratamiento y que se debe realizar un seguimiento continuo para evaluar y ajustar los planes terapéuticos necesarios (De la Llana et al., 2020).

En relación a las terapias híbridas: tIMRT - tVMATmm, ofrecen una ventaja en cuanto a la dosimetría de órganos de riesgo como el corazón y los pulmones, disminuyendo la toxicidad en estos tejidos sensibles. Además, permite mejorar la cobertura del PTV sin incremento significativo en la dosis de los órganos de riesgo, facilitando así el tratamiento más eficiente y seguro. Además, una desventaja está relacionada con la generación de dosis elevadas en los pulmones y el corazón, aumentando el riesgo de complicaciones pulmonares y cardíacas (Chen et al, 2020).

En las terapias híbridas: VMAT combinado – terapia convencional de campo tangencial, la ventaja está relacionada con maximizar la efectividad del tratamiento, al tiempo que minimizan los riesgos para los órganos cercanos, la reducción de la irradiación en estos tejidos sensibles disminuye la posibilidad de efectos secundarios adversos, siendo una opción segura y eficaz. Sin embargo, una de las desventajas está en que el aumento de la dosis irradiada al pulmón contralateral y al esófago genera incremento en el riesgo de complicaciones a largo plazo, como enfermedades pulmonares o esofagitis (Doi et al, 2020).

Finalmente, las terapias 3D-CRT/IMRT (radioterapia conformada tridimensional/intensidad modulada), una de las ventajas es que permite la administración exacta de la dosis de radiación, siendo efectiva para el tratamiento de los tumores y protegiendo los tejidos sanos 7 circundantes, minimizando complicaciones a largo plazo. Sin embargo, la desventaja está en que las dosis administradas son consideradamente altas que pueden generar toxicidad pulmonar a largo plazo (Liu et al., 2020).

### **3. Conclusiones**

En el estudio se realizó un análisis de 30 artículos científicos, comparó los métodos híbridos y VMAT en el tratamiento del cáncer de mama y demostró que estos métodos han logrado resultados positivos. La mayoría de los documentos provienen de Google Scholar, incluidos documentos importantes de países como China, Turquía, Australia e India. El inglés es el idioma principal y en 2023 habrá una cantidad extraordinaria de publicaciones centradas en terapias como VMAT y H-IMRT. A pesar de los avances, se enfatiza la necesidad de realizar más investigaciones para fortalecer y ampliar el marco bibliográfico en este campo.

En las terapias híbridas, se han evidenciado ventajas en el tratamiento de cáncer de mama, entre ellas la reducción de la dosis de radiación a órganos cercanos, como el corazón y los pulmones, disminuyendo el riesgo de toxicidad y complicaciones. Así mismo, la mejora de la cobertura y conformación de la radiación que reduce la exposición a órganos críticos, minimizando efectos secundarios y riesgo de padecer cáncer secundario. Además, se mejora la comodidad del paciente y disminuye los riesgos a largo plazo.

Las técnicas híbridas y VMAT en el tratamiento del cáncer de mama ofrecen diversas ventajas. Se centran en la reducción de la toxicidad en órganos adyacentes y en la mejora de la precisión del tratamiento. Además, la utilización de bolos virtuales contribuye a la comodidad del paciente y a la disminución del tiempo de tratamiento. La optimización de la dosis permite proteger órganos vitales y, al mismo tiempo, se observan bajos niveles de toxicidad aguda. Por último, estas técnicas ofrecen flexibilidad en la planificación, lo que facilita un enfoque más personalizado del tratamiento.

Algunas desventajas están relacionadas con el alto costo y la necesidad de equipos especializados limitan su disponibilidad en muchos centros, lo que puede afectar la eficiencia del tratamiento. Además, su mayor complejidad en la planificación y la implementación puede aumentar la exposición a dosis en órganos no objetivos, incrementando el riesgo de efectos secundarios. Por ello, es crucial que la elección de la técnica se realice mediante una evaluación

cuidadosa y personalizada, teniendo en cuenta tanto las características del paciente como las limitaciones de cada opción terapéutica.

Las terapias híbridas y VMAT para el tratamiento del cáncer de mama presentan varias desventajas. En primer lugar, su alto costo implica una inversión significativa, lo que restringe su disponibilidad en muchas instituciones de salud. Además, el tiempo de planificación es considerablemente prolongado, ya que estas técnicas requieren habilidades técnicas avanzadas y un enfoque meticuloso. También existe el riesgo de exposición a dosis bajas en tejidos sanos, lo que puede comprometer la seguridad del tratamiento. La complejidad de la implementación, junto con el aumento de dosis en órganos de riesgo, añade más desafíos. Por último, es fundamental contar con personal especializado capacitado para llevar a cabo estas técnicas, lo que puede limitar su uso en ciertos entornos clínicos.

#### **4. Recomendaciones**

Es pertinente que se continúen realizando estudios de revisión bibliográfica y más aun abordando lo relacionado a las terapias híbridas, puesto que el tratamiento de radioterapia para el cáncer de mama es amplio y por lo tanto se requiere incrementar los conocimientos.

Se considera que hay un aporte significativo en el desarrollo del trabajo como es la cartilla, es pertinente que se difunda y se la tenga en cuenta en los educandos del programa de Radiodiagnóstico y Radioterapia de la Universidad Mariana, porque le brinda la posibilidad de incrementar los conocimientos sobre esta temática de amplia utilidad en la práctica preprofesional.

Se sugiere que se fortalezcan los conocimientos a los educandos respecto a las terapias híbridas, constituyéndose uno de los aportes al tratamiento de cáncer de mama, por tal motivo, esto aportaría en el proceso de atención en el área de radioterapia.

## Referencias bibliográficas

- American Cancer Society. (2020). Cómo se usa la radioterapia para tratar el cáncer. *cancer.org*.  
Obtenido de <https://n9.cl/d5q1q>
- Balaji, K., & Ramasubramanian, V. (2022). Enfoque de puntuación integrado para evaluar la calidad del plan de radioterapia para el tratamiento del cáncer de mama. *Reports of practical oncology and radiotherapy : journal of Great Poland Cancer Center in Poznan and Polish Society of Radiation Oncology*, 707-716. doi:<https://doi.org/10.5603/RPOR.a2022.0083>
- Bartlett, J., Sgroi, D., Treuner, K., Zhang, Y., Ahmed, I., Piper, T., . . . Rea, D. (2019). Índice de cáncer de mama y predicción del beneficio de la terapia endocrina prolongada en pacientes con cáncer de mama tratadas en el ensayo aTTom (Tamoxifeno adyuvante: ¿para ofrecer más?). *Annals of Oncology*, 30(11), 1776-1783. Obtenido de <https://lc.cx/4Ovmqn>
- Bi, S., Zhu, R., & Dai, Z. (2022). Comparación dosimétrica y radiobiológica de la radioterapia de refuerzo integrada simultánea para el cáncer de mama de lado derecho en estadio temprano entre tres técnicas: IMRT, IMRT híbrida y VMAT híbrida. *Radiation oncology (London, England)*, 17(1), 60. doi:<https://doi.org/10.1186/s13014-022-02009-2>
- Bonaccorsi, S., Haberer, T., Hoeltgen, L., Meixner, E., harrabi, S., Hörner Rieber, J., . . . Mairami, A. (2024). Exploración del potencial de los iones de helio para la radioterapia del cáncer de mama del lado izquierdo después de una mastectomía. *Cancers*, 16(410), 1-18. Obtenido de <https://lc.cx/RXmst6>
- Ciril Voyant ,Morgane Pinpin ,Delfina Leschi ,Séverine Prapant ,Françoise Savigny yMarie-Aimée Acquaviva. (2023). La radioterapia híbrida VMAT-3DCRT como herramienta para mejorar el tratamiento del cáncer de mama. *Sci Rep* 13, 23110. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-023-50538-x>

Cuenta de Alto Costo. (2023). Día mundial de la lucha contra el cáncer de mama 2023. *cuentadealtocosto.org*. Obtenido de <https://n9.cl/ib2ca>

De la Llana, V., del Castillo, Á., Andrés, C., Gómez, L., Agulla, M., del Valle, ML, ... Torres, R. (2021). Breast boost vector: una nueva métrica propuesta para optimizar la ubicación del isocentro en una técnica híbrida fIMRT–VMAT para un boost integrado simultáneo en radioterapia de mama. *Journal of Radiotherapy in Practice*, 20(2), 158-163. doi:doi:10.1017/S1460396920000242

Doi, Y., Nakao, M., Miura, H., Ozawa, S., Kenjo, M., & Nagata, Y. (2020). Terapia de arco modulada volumétrica híbrida para el cáncer de mama posoperatorio, incluidos los ganglios linfáticos regionales: la ventaja de los datos dosimétricos y la seguridad de las toxicidades. *Journal of radiation research*, 747-754. doi:<https://doi.org/10.1093/jrr/rraa057>

Domingos, T. M. (2020). *Validación de una técnica híbrida en arcoterapia volumétrica (H-VMAT) para tratamientos de mama*. Tesis de maestría (optar título de Maestría en Protección Radiológica9, Instituto Federal De Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis Departamento Acadêmico De Saúde E Serviços, Florianópolis - Brasil. Obtenido de <https://lc.cx/rVrszl>

El Congreso de Colombia. (2010). Ley 1384. Ley Sandra Ceballos, por la cuál se establecen las acciones para la atención integral del cancer en Colombia. *Diario Oficial*. Obtenido de <https://lc.cx/3Rphmm>

Él, Y., Chen, S., Xiang, G., Rong, F. L., Kang, Z., & Liu, J. (2023). Robustez del VMAT ante errores de configuración en radioterapia posmastectomía del cáncer de mama del lado izquierdo: impacto del espesor del bolo. *Journal Plos One*. Obtenido de <https://lc.cx/njaYNd>

Haldar, S., Saroj, D., Dixit, A., Sarkar, B. y Yadav, S. (2023). Viabilidad de la planificación del tratamiento IMRT híbrido para la irradiación de la pared torácica del lado izquierdo: un estudio

comparativo de planificación del tratamiento. *Revista iraní de física médica*, 20(1), 31-41. doi:doi: 10.22038/ijmp.2022.60694.2022

He, Y., Chen, S., Gao, X., Fu, L., Kang, Z., Liu, J., . . . Li, Y. (2023). Robustness of VMAT to setup errors in postmastectomy radiotherapy of left-sided breast cancer: Impact of bolus thickness. *PLoS One*, 18(1). Obtenido de <https://lc.cx/C9Yh7B>

Instituto Nacional de Cancerología . (2021). *Cancer cifras*. Obtenido de <https://www.cancer.gov.co/medios-comunicacion-1/multimedia/destacados/cancer-cifras-1>

Instituto Nacional del Cáncer. (s.f.). *Tumor*. Recuperado el 5 de 09 de 2024, de <https://lc.cx/BUD7px>

Jianjian, Q., Zhang, S., Zheng, X., & Lv, B. (2021). Estrategia de control y optimización de la dosis cardíaca para radioterapia de cáncer de mama izquierdo con tecnología VMAT no uniforme. *Technol Cancer Res Treat*, 20. Obtenido de <https://lc.cx/fMslt8>

Lamprecht, B., Muscat, E., Harding, A., Howe, K., Brown, E., Barry, T., Mai, G. T., Lehman, M., Bernard, A., Hargrave, C., & Harvey, J. (2022). Comparación de técnicas de dosimetría de mama completa: de 3DCRT a VMAT y el impacto en el corazón y los tejidos circundantes. *Journal of medical radiation sciences*, 98-107. doi:<https://doi.org/10.1002/jmrs.541>

Liu, Y. C., Chang, H. M., Lin, H. H., Lu, C. C., & Lai, L. H. (2020). Dosimetric Comparison of Intensity-Modulated Radiotherapy, Volumetric Modulated Arc Therapy and Hybrid Three-Dimensional Conformal Radiotherapy/Intensity-Modulated Radiotherapy Techniques for Right Breast Cancer. *Journal of clinical medicine*, 9(12), 3884. doi:<https://doi.org/10.3390/jcm9123884>

Marrazzo, L., Redapi, L., Pellegrini, R., Voet, P., Meattini, I., Arilli, C., . . . Pallotta, S. (2023). Técnica de arcoterapia modulada volumétrica totalmente automatizada para la radioterapia del

- cáncer de mama localmente avanzado. *Radiation Oncology*, 18(176), 1-9. Obtenido de <https://lc.cx/arFShT>
- Mejía Rojas, M., Contreras Rengifo, A., & Hernández Carrillo, M. (2020). Calidad de vida en mujeres con cáncer de mama sometidas a quimioterapia en Cali, Colombia. *Biomedica*, 40(2), 349-361. Obtenido de <https://lc.cx/HgHDkK>
- Ministerio de salud y protección Social. (2012). *Plan nacional para el control del cáncer en Colombia 2012-2020*. Plan Nacional, Instituto Nacional de Cancerología, Bogotá D.C. Obtenido de <https://lc.cx/Kzvtff>
- Misher, C. (2024). *Terapia de arco modulada volumétrica (VMAT)*. Recuperado el 15 de 10 de 2024, de <https://lc.cx/L5NVjz>
- Organización Mundial de la Salud y Organización Panamericana de la Salud. (Agosto de 2022). Cáncer de mama. *OMS*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/breast-cancer>
- Prokofev, I., & Salim, N. (2024). Técnica VMAT no isocéntrica para el cáncer de mama: reducción efectiva de la dosis en órganos en riesgo y su aplicabilidad en función de la anatomía del paciente. *Revista de física médica clínica aplicada*, 25(3). Obtenido de <https://lc.cx/6oFij1>
- Puente, J. (2019). *¿Qué es el cáncer y cómo se desarrolla?* Recuperado el 01 de 08 de 2024, de <https://lc.cx/GzW-5S>
- Qiu, J., Zhang, S., Bo, L., & Zheng, X. (2021). Estrategia de control y optimización de dosis cardíaca para radioterapia de cáncer de mama izquierdo con tecnología VMAT no uniforme. *Technol Cancer Res Treat*. Obtenido de <https://lc.cx/ODI0cZ>
- Racka, I., Majewska, K., Winiecki, J., & Kiluk, K. (2023). Técnicas de planificación híbrida para el cáncer de mama del lado izquierdo en etapa temprana: análisis de la distribución de dosis y

- estimación del riesgo relativo de cáncer secundario proyectado. *Acta oncologica (Stockholm, Sweden)*, 62(8), 932-941. doi:<https://doi.org/10.1080/0284186X.2023.2238553>
- Rossi, M., Boman, E., Skyttä, T., Haltamo, M., Laaksomaa, M., & Kapanen, M. (2018). Efectos dosimétricos de las deformaciones anatómicas y errores de posicionamiento en la radioterapia de mama VMAT. *Journal of applied clinical medical physics*, 19(5), 506-516. doi:<https://doi.org/10.1002/acm2.12409>
- Salim, N., Popodko, A., Tumanova, K., Stolbovoy, A., Lagkueva, I., & Ragimov, V. (2023). Dosis cardíaca en el tratamiento de pacientes con cáncer de mama bilateral sincrónico entre tres técnicas de radioterapia diferentes (VMAT, IMRT y CRT 3D). *Discover Oncology*, 14(29). Obtenido de <https://lc.cx/h-LAhR>
- Santos, A. M. C., Kotsanis, A., Cunningham, L., & Penfold, S. N. (2021). Estimación del segundo riesgo de cáncer primario debido a la terapia de protones en comparación con la IMRT híbrida para el cáncer de mama del lado izquierdo. *Acta oncologica (Stockholm, Sweden)*, 300-304. doi:<https://doi.org/10.1080/0284186X.2020.1862421>
- Saraç Canbolat H. , Demircan Nv , Çatli Dinç S. , Şentürk Me , Bora H. (2023). Investigación dosimétrica de técnicas de planificación FIF, VMAT, IMRT, H-VMAT y H-IMRT en radioterapia del cáncer de mama. *Reista Turca Oncologica*, 45-51. doi:10.5505/tjo.2022.3740
- Semaya Natalia Chen, P. R. (2020). Estudio comparativo dosimétrico de las técnicas 3DCRT, IMRT, VMAT, Ecomp e híbridas para radioterapia de mama. *Revista de Oncología Radioterapéutica*, 270-281. doi:<https://doi.org/10.3857/roj.2020.00619>
- Subhas Haldar, Archana Dixiti, Biplab Sarkar. (2023). Estudio dosimétrico del plan de tratamiento de radioterapia de intensidad modulada híbrida con haz de fotones libres de filtro aplanado para carcinoma de mama: estudio de planificación del tratamiento. *Turkhis Journal Of Oncology*, 38(2), 145-54. doi:doi: 10.5505/tjo.2022.3783

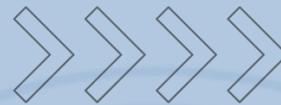
- Sultan ÇİT., Canan KÖKSAL AKBAŞ., Kamuran İBİŞ., Hatice Bilge BECERİR. (2023). Investigación del efecto de técnicas híbridas creadas con radioterapia de intensidad modulada sobre la calidad del plan en radioterapia del cáncer de mama. *TURKISH JOURNAL of ONCOLOGY*, 55-61. doi:doi: 10.5505/tjo.2022.3819
- Sushma, N., Kaginelli, S., Sathiyaraj, P., Sakthivel, V., & Ganesh , K. (2022). Estimación de dosis utilizando un dosímetro de luminiscencia estimulada ópticamente y películas EBT3 para diversas técnicas de tratamiento en un maniquí Alderson Rando y estimación de la incidencia de cáncer secundario en el carcinoma de mama izquierda. *Journal of Medical Physics*, 225-234. doi:[https://doi.org/10.4103/jmp.jmp\\_36\\_22](https://doi.org/10.4103/jmp.jmp_36_22)
- Tatiane Mayla Domingos Prandi., Herofen Zaias., Charlene da Silva., Juliana dos Santos Müller. (2024). Radioterapia del Cáncer de Mama: Análisis de la Técnica de Terapia de Arco. *Revista Brasileira de Cancerologia*, 70(3), e-034711. doi:<https://doi.org/10.32635/2176-9745.RBC.2024v70n3.4711>
- Tsai, Y.-C., Wang, C.-C., Wang, C.-W., Liang, H.-K., Wang, S.-F., Wu, C.-J., & Lin, C.-S. (2022). Método eficiente para la radioterapia de mama completa utilizando aceleradores lineales Halcyon. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 23(7). Obtenido de [https://lc.cx/xPQ\\_h9](https://lc.cx/xPQ_h9)
- Ugurlu, T., Akbaş, C., Ibis, K., & Becerir, H. (2022). Efecto del uso de bolo virtual en la calidad del plan VMAT para pacientes con cáncer de mama del lado izquierdo. *Applied Radiation and Isotopes*, 189. Obtenido de <https://lc.cx/UUqkIA>
- Venjakob, A., Oertel, M., Hering, D. A., Moustakis, C., Haverkamp, U., & Eich, H. T. (2021). Terapia de arco modulado volumétrico híbrido para la radioterapia hipofraccionada del cáncer de mama: un estudio de planificación del tratamiento. *Strahlentherapie und Onkologie*, 296-307. doi:<https://doi.org/10.1007/s00066-020-01696-8>

- Voyant, C., Morgane, A., Leschi, D., Prapant, S., Savigny, F., & Acquaviva, M.-A. (2023). VMAT-3DCRT híbrido como herramienta de mejora del tratamiento del cáncer de mama. *Informes Científicos volume, 13*. Obtenido de <https://lc.cx/a8AJbo>
- Wei, T. N., Yeh, H. L., Lin, J. F., & Hung, C. C. (2023). Resultado clínico de la radioterapia postoperatoria con técnica de planificación híbrida en el cáncer de mama izquierdo después de cirugía conservadora de mama. *Cancer medicine, 12*(5), 5364–5371. doi:<https://doi.org/10.1002/cam4.5358>
- Zhang, Q., Zeng, , Y., Peng, Y., Yu, H., Zhang, S., & Wu, S. (2023). Evaluación crítica del riesgo de cáncer secundario después de la radioterapia de mama con técnicas de radioterapia híbrida. *Dovepress, 25*-38. doi:<https://doi.org/10.2147/BCTT.S383369>
- Zhang, Y. Q., Weihua, F., Brandner, E., Percinski, S., & Moran, M. H. (2024). Minimización del baño de dosis baja de tejido normal para la terapia de arco modulado volumétrico (VMAT) de la mama izquierda utilizando desplazamiento de mandíbula. *Revista de física médica clínica aplicada, 25*(8). Obtenido de <https://lc.cx/Dikxc1>

**Anexos**

**Anexo A. Cartilla digital: comparación de técnicas híbridas vs técnica VMAT en el tratamiento del cáncer de mama.**





# ÍNDICE

## INTRODUCCIÓN

El cáncer de mama es uno de los problemas de salud pública más relevantes a escala global, con una incidencia que ha experimentado un incremento en las últimas décadas. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), se registraron cerca de 2.3 millones de nuevos casos durante el 2022, situándolo a esta enfermedad como la más frecuente entre las mujeres. Además, en ese mismo año, el cáncer de mama causó más de 670,000 fallecimientos, lo que resalta su efecto devastador, especialmente en naciones de ingresos medios y bajos, donde los recursos para el tratamiento pueden ser escasos. Hasta agosto de 2023, en Colombia se registraron 107,181 casos predominantes de cáncer de mama, evidenciando así un aumento en la incidencia y mortalidad de esta enfermedad en el país (Cuenta de Alto Costo, 2023).

El tratamiento en cáncer de mama ha experimentado una evolución considerable con el progreso de las tecnologías médicas, siendo la radioterapia una de las técnicas terapéuticas más frecuentemente empleadas. Esta metodología facilita la eliminación de las células malignas ubicadas en la mama y zonas adyacentes, reduciendo así el perjuicio a los tejidos saludables cercanos. Específicamente, la radioterapia ha probado ser eficaz no solo en el tratamiento del tumor primario, sino también en la prevención de la recaída del cáncer después de una operación o quimioterapia (Delaney et al., 2017). Dentro de los métodos más sofisticados que han emergido en el ámbito de la radioterapia, destacan la Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT) y las técnicas híbridas, que fusionan diversas estrategias para mejorar la administración de la dosis y minimizar los efectos secundarios en los pacientes.

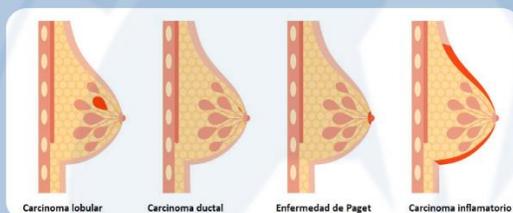
La necesidad de contrastar estos dos métodos proviene del aumento en la relevancia de la personalización de los tratamientos radioterapéuticos. VMAT ha obtenido un gran reconocimiento por su habilidad para administrar dosis de radiación de forma exacta y veloz, lo que disminuye considerablemente el tiempo de tratamiento y potencia la comodidad del paciente (Boda-Heggemann et al., 2015). En contraposición, los métodos híbridos, que fusionan técnicas como la radioterapia conformada tridimensional (3D-CRT) y la radioterapia de intensidad modulada (IMRT), posibilitan un control más exhaustivo de la dosimetría, lo que conduce a una mayor defensa de los órganos vulnerables y a una mayor cobertura del volumen de tumores (Tatiane et al., 2024).

El propósito principal de esta cartilla es contrastar la eficacia de las técnicas de radioterapia VMAT con las técnicas combinadas en el tratamiento del cáncer de mama. Para alcanzar este objetivo, se examinarán investigaciones clínicas que valoran la efectividad de ambas técnicas, se especificarán los fundamentos técnicos de cada una y se valorará su influencia en la salvaguarda de órganos adyacentes y en la calidad de vida de los pacientes. Además, esta cartilla servirá de manera útil a los estudiantes del Programa de Tecnología en Radiodiagnóstico y Radioterapia de la Universidad Mariana para fortalecer sus conocimientos.

## »»»» CÁNCER DE MAMA: ASPECTOS FUNDAMENTALES

### DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL CÁNCER DE MAMA

El cáncer de mama es una patología maligna que surge en las células del tejido del pecho. Este tipo de cáncer suele comenzar en los conductos (carcinoma ductal) o en los lóbulos (carcinoma lobulillar), que son las estructuras encargadas de transportar y generar la leche. A pesar de que estos tipos de cáncer son los más frecuentes, también hay variantes menos comunes como el cáncer de mama inflamatorio y el cáncer de mama triple negativo, el cual se distingue por la falta de receptores hormonales y de HER2, lo que lo hace una forma más agresiva y de tratamiento complicado (Tatiane et al., 2024).



Además, el cáncer de mama se categoriza en función de su nivel de invasión, los carcinomas in situ son los que no han trascendido los conductos o los lóbulos. No obstante, el carcinoma invasivo es el más riesgoso, ya que posee la habilidad de propagarse a otros tejidos y órganos, un fenómeno denominado metástasis. Para la adecuada categorización y terapia del cáncer de mama, se utilizan varias pruebas diagnósticas como biopsias, mamografías y resonancias magnéticas, las cuales facilitan la identificación del tipo y la magnitud de la enfermedad.

Respecto a su categorización molecular, los tumores pueden ser hormonodependientes (los que muestran receptores de estrógeno y/o progesterona) o HER2 positivos, lo cual tiene un impacto considerable en las alternativas de terapia. Los tumores que poseen receptores hormonales suelen recibir tratamiento hormonal, en cambio, los tumores con positivo en HER2 suelen responder positivamente a terapias dirigidas como el trastuzumab. Por otro lado, los tumores "triple negativo" no muestran ninguno de estos receptores, lo que los convierte en más complicados de tratar y suelen necesitar quimioterapia más intensa (Tatiane et al., 2024).

## FACTORES DE RIESGO MÁS COMUNES

El desarrollo del cáncer de mama está vinculado a una combinación de factores de riesgo genéticos, hormonales, ambientales y de estilo de vida. Entre los más destacados están:

### EDAD Y GÉNERO

La mayoría de los casos de cáncer de mama se diagnostican en mujeres mayores de 50 años. Aunque raro, el cáncer de mama también puede afectar a los hombres (Cuenta de Alto Costo, 2023).



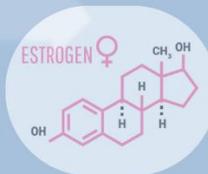
### ANTECEDENTES FAMILIARES



Las mujeres con antecedentes familiares de cáncer de mama o cáncer de ovario, especialmente si los casos ocurrieron en familiares de primer grado (madre, hermana), tienen un mayor riesgo. Las mutaciones en los genes BRCA1 y BRCA2 incrementan considerablemente la probabilidad de desarrollar cáncer de mama y de ovario (Vlasov, 2024).

### FACTORES REPRODUCTIVOS Y HORMONALES

Las mujeres que tienen su primera menstruación a una edad temprana (antes de los 12 años), tienen su primer embarazo a una edad avanzada o no han tenido hijos, y aquellas que alcanzan la menopausia tardía tienen un mayor riesgo debido a una mayor exposición a los estrógenos (Cuenta de Alto Costo, 2023).



### ESTILO DE VIDA



Factores como el consumo excesivo de alcohol, el sedentarismo y la obesidad, especialmente después de la menopausia, están asociados con un mayor riesgo de desarrollar cáncer de mama. Las mujeres que se someten a terapia de reemplazo hormonal (TRH) también pueden enfrentar un riesgo incrementado (Tatiane et al., 2024).

El reconocimiento de estos factores de riesgos ha facilitado la puesta en marcha de estrategias de prevención y detección precoz. Aunque algunos de estos factores no pueden ser alterados (edad, genética), otros pueden ser gestionados, como mantener un estilo de vida sano y llevar a cabo revisiones de detección periódicas, especialmente en mujeres con mayor propensión.

## ESTADÍSTICAS DE INCIDENCIA Y MORTALIDAD EN COLOMBIA

En Colombia, la principal causa de fallecimiento por cáncer en mujeres es el cáncer de mama. De acuerdo con los últimos datos de la Cuenta de Alto Costo (2023), hasta agosto de 2023 se identificaron 107,181 casos predominantes de cáncer de mama, lo que implica un incremento en relación a los años previos. Este aumento puede ser parcialmente atribuido a programas de detección más eficaces, como las campañas de mamografías sin costo, pero también muestra el crecimiento de factores de riesgo vinculados al envejecimiento poblacional y las modificaciones en los estilos de vida (Cuenta de Alto Costo, 2023).

La tasa de mortalidad vinculada al cáncer de mama en Colombia también ha revelado datos alarmantes. Si bien el índice de mortalidad ha experimentado una leve reducción gracias a avances en la detección y el tratamiento, aún se reporta una tasa de mortalidad del 10% entre los casos detectados. Este hecho es particularmente significativo en áreas rurales, donde el acceso a diagnósticos precoces y terapias avanzadas, como la radioterapia de alta precisión y la quimioterapia, es restringido (Cuenta de Alto Costo, 2023).



Por lo tanto, la mejora en la disponibilidad y el acceso a tecnologías de tratamiento como VMAT y las técnicas híbridas en el contexto colombiano es esencial para reducir estas cifras y mejorar la supervivencia a largo plazo. Estas técnicas avanzadas permiten una administración más precisa de la radiación, reduciendo los efectos secundarios y mejorando los resultados clínicos (Tatiane et al., 2024).

## FUNDAMENTOS DE RADIOTERAPIA EN EL CÁNCER DE MAMA >>>>

La radioterapia es uno de los métodos de tratamiento más relevantes en el tratamiento del cáncer de mama, particularmente en pacientes que han sufrido intervenciones quirúrgicas conservadoras o en aquellos con tumores inoperantes. Su meta es eliminar las células malignas que puedan haber permanecido en el área tratada o disminuir la magnitud del tumor para simplificar su eliminación quirúrgica futura. Adicionalmente, la radioterapia juega un papel crucial en el tratamiento paliativo, contribuyendo a mitigar los síntomas en pacientes con enfermedades avanzadas, como el dolor vinculado a metástasis en los huesos (Tatiane et al., 2024).

### PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA RADIOTERAPIA

La radioterapia emplea radiaciones ionizantes, que son haces de energía que ingresan a los tejidos con el objetivo de perjudicar el ADN de las células malignas. Las células sanas también pueden ser impactadas por la radiación, aunque poseen una mayor habilidad para curar el perjuicio en comparación con las células malignas. Esto posibilita que la radioterapia sea eficaz en la erradicación de las células malignas, al mismo tiempo que se mantienen los tejidos saludables en la mayor medida posible.

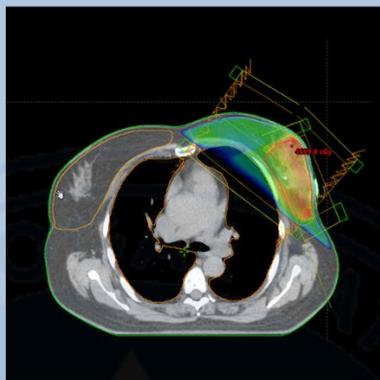


El principio básico de la radioterapia es el fraccionamiento, que implica dividir la dosis total de radiación en múltiples sesiones (fracciones) diarias. Esto permite que las células normales tengan tiempo de recuperarse entre sesiones, mientras que las células cancerosas, que son menos eficientes en su reparación, acumulan el daño progresivamente hasta morir. El tratamiento puede durar entre 3 a 6 semanas, dependiendo del tipo y la etapa del cáncer, así como del estado general del paciente.

Adicionalmente, la radioterapia utiliza de imágenes diagnosticas, tales como la tomografía computarizada (TC), la resonancia magnética (RM) y, en ciertas situaciones, la tomografía por emisión de positrones (PET), para diseñar con exactitud el área que será objeto de la radioterapia. La programación fundamentada en imágenes facilita la disminución de la exposición de los órganos adyacentes, incrementando la eficacia del tratamiento y minimizando los efectos adversos (Vlasov, 2024).

## TÉCNICAS DE RADIOTERAPIA

La radioterapia tridimensional conformada (3D-CRT) es un método que posibilita la conformación de los haces de radiación para adaptarse a la forma tridimensional del tumor. Este procedimiento emplea imágenes de tomografía computarizada para trazar con exactitud el volumen del tumor y los órganos próximos a riesgo. Basándose en estas imágenes, los oncólogos organizan la dirección de los haces de radiación desde distintos ángulos con el objetivo de maximizar la dosis al tumor y reducir la exposición a órganos saludables como el corazón y los pulmones en casos de cáncer de mama.



A pesar de que 3D-CRT ha incrementado significativamente la exactitud del tratamiento en comparación con los métodos más antiguos, presenta ciertas restricciones. Una de las características clave es que no permite una modulación sofisticada de la intensidad del haz de radiación, lo que implica que en ciertas áreas, el tejido sano podría recibir una dosis superior a la esperada. Sin embargo, continúa siendo una alternativa viable en pacientes donde la anatomía del tumor es bastante simple y no se necesita una modulación exacta.

En cuanto, a la radioterapia intensidad modulada (IMRT) es una evolución de la 3D-CRT y facilita la modificación de la intensidad de los rayos de radiación. Se consigue esto mediante el uso de tecnología de vanguardia que ajusta la dosis según la localización y el tipo de tumor, facilitando así una repartición de la dosis más exacta. En el tratamiento del cáncer de mama, la IMRT resulta particularmente beneficiosa cuando el tumor se encuentra próximo a órganos vitales como el corazón, pues facilita la protección de estos tejidos susceptibles a altas dosis de tratamiento.

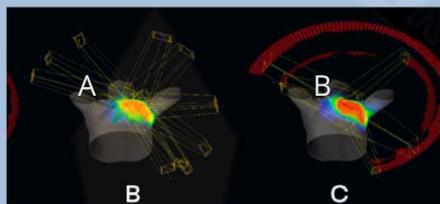
En numerosos centros de radioterapia, el IMRT se emplea, dado que incrementa notablemente la defensa de los órganos vulnerables y la repartición de la dosis en tumores de formas irregulares.

Hablar de la Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT) se puede afirmar que es un método de radioterapia de vanguardia que fusiona las ventajas de la IMRT con una gestión del tratamiento más eficaz. En contraste con IMRT, en el que los haces de radiación se ubican en posiciones estables, en VMAT, el acelerador lineal rota alrededor del paciente mientras suministra la radiación. Esto posibilita la modificación constante de la forma y la intensidad de los haces durante el giro, lo que incrementa la cobertura del tumor y disminuye el tiempo de tratamiento (Vlasov, 2024).

VMAT ha probado ser especialmente eficaz en el tratamiento del cáncer de mama, dado que facilita una repartición de la dosis más uniforme en zonas complicadas como el tórax, y disminuye la posibilidad de irradiar tejidos vitales como el corazón y los

pulmones. Las investigaciones también han demostrado que VMAT disminuye el tiempo de tratamiento por sesión, lo que resulta en un aumento de la comodidad para los pacientes y una eficiencia superior en los centros de tratamiento.

Las técnicas híbridas fusionan diversas formas de radioterapia con el fin de optimizar la exactitud y eficacia del tratamiento. Por ejemplo, uno de los métodos más habituales es el de H-VMAT, que amalgama la arcoterapia volumétrica con la radioterapia conformada en tres dimensiones. Esta mezcla facilita una mayor exactitud en la administración de la dosis en pacientes con anatomías más complejas o tumores de gran envergadura, en los que se requiere un ajuste más minucioso (Tatiane et al., 2024).



Diseño de la planificación del tratamiento para dos técnicas: (A) IMRT; (B) H-VMAT

## DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS TÉCNICAS DE RADIOTERAPIA VMAT Y TÉCNICAS HÍBRIDAS

### ARCOTERAPIA VOLUMÉTRICA MODULADA (VMAT)

La Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT) es un método sofisticado de radioterapia que emite radiación al rotar el acelerador lineal alrededor del paciente, ajustando de manera constante la intensidad y el ángulo del haz. VMAT posibilita una repartición exacta y uniforme de la dosis en el volumen del tumor, modificando de manera dinámica los parámetros de radiación durante el tratamiento, lo que incrementa la cobertura del tumor y reduce la exposición a los órganos a riesgo. De acuerdo con las investigaciones de Lee et al. (2023), VMAT ha probado ser especialmente efectivo en pacientes con cáncer de mama, dado que disminuye considerablemente la dosis en el corazón y los pulmones, en particular en situaciones de cáncer de mama izquierdo.



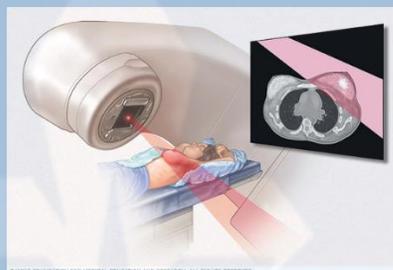
Adicionalmente, uno de los beneficios más sobresalientes de VMAT es la disminución del tiempo de tratamiento, lo que incrementa la confortabilidad del paciente y potencia la habilidad de los centros de tratamiento para tratar a más pacientes cada día (Wang et al., 2022). Es fundamental esta eficacia en la distribución de la radiación para disminuir la fatiga y el estrés vinculados al tratamiento extendido.



## TÉCNICAS HÍBRIDAS

Las técnicas híbridas fusionan distintas técnicas de radioterapia suelen combinar la Radioterapia Conformada Tridimensional (3D-CRT) con métodos sofisticados como VMAT o IMRT, lo que facilita una personalización más eficaz del tratamiento según la anatomía del paciente y las particularidades del tumor (Chen et al., 2023). En el ámbito del cáncer de mama, las técnicas híbridas han probado ser eficaces cuando se necesita una precisión superior para salvaguardar órganos a riesgo, como el corazón, sin afectar la eficacia en la eliminación de células malignas.

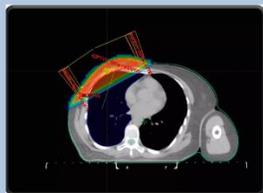
García et al., (2023) han indicado que la mezcla de VMAT con 3D-CRT proporciona una alternativa efectiva para el tratamiento de pacientes con anatomías complejas o tumores de gran envergadura. Las técnicas combinadas facilitan una conformación del haz más exacta, lo que optimiza la repartición de la dosis y disminuye la toxicidad aguda en los tejidos saludables que se encuentran alrededor. Este método también resulta especialmente útil en el tratamiento del cáncer de mama izquierda, en el que es esencial reducir la dosis que afecta al corazón.



A pesar de las ventajas de las técnicas híbridas, una de sus desventajas es el tiempo de tratamiento más prolongado en comparación con VMAT puro. Johnson et al. (2024) señalan que, aunque las técnicas híbridas proporcionan una mayor flexibilidad en la planificación, los tiempos de tratamiento pueden ser más largos debido a la necesidad de ajustar varios parámetros y combinar diferentes modalidades de radioterapia. Sin embargo, en términos de precisión y personalización, las técnicas híbridas siguen siendo una opción viable para pacientes con características tumorales complejas.

## COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE VMAT Y TÉCNICAS HÍBRIDAS

### DOSIMETRÍA Y DISTRIBUCIÓN DE LA DOSIS



La dosimetría es un elemento esencial para valorar la eficacia de los métodos radioterapéuticos. Para la VMAT (Arcoterapia Volumétrica Modulada), se distingue por su habilidad para aplicar una dosis homogénea en el volumen del tumor objetivo con gran exactitud, reduciendo la exposición de los órganos saludables

próximos. VMAT consigue este beneficio a través de la regulación constante de la intensidad del haz de radiación, lo que facilita una cobertura más uniforme del tumor, optimizando la adherencia al tratamiento.

Por otro lado, las técnicas híbridas, como la combinación de VMAT con 3D-CRT, permiten una mayor personalización en la entrega de la dosis, combinando los beneficios de ambas técnicas. Según Domingos (2020), la técnica híbrida H-VMAT (80% 3D-CRT y 20% VMAT) proporciona una excelente cobertura del volumen objetivo, manteniendo las dosis en los órganos de riesgo dentro de límites seguros .

### PROTECCIÓN DE ÓRGANOS EN RIESGO

VMAT se destaca por su habilidad de disminuir la dosis que reciben los órganos en riesgo (OAR), tales como el corazón y los pulmones, lo cual es vital para evitar efectos adversos crónicos como la cardiotoxicidad y la fibrosis pulmonar.



VMAT se destaca por su habilidad de disminuir la dosis que reciben los órganos en riesgo (OAR), tales como el corazón y los pulmones, lo cual es vital para evitar efectos adversos crónicos como la cardiotoxicidad y la fibrosis pulmonar. Específicamente, el método VMAT ha probado ser sumamente efectivo para reducir la exposición cardíaca durante el tratamiento del cáncer de mama izquierda.

En contraste, las técnicas combinadas también han demostrado una excelente defensa de los OAR. Domingos (2020) señaló que H-VMAT disminuye la exposición de órganos vitales, como la mama contralateral, ofreciendo un alto grado de conformidad en el volumen de referencia. Sin embargo, ciertas investigaciones indican que la organización más sofisticada en las técnicas híbridas puede prolongar el tiempo de tratamiento.

### **TOXICIDAD Y EFECTOS SECUNDARIOS**

VMAT ha evidenciado una disminución considerable de la toxicidad aguda, tales como la dermatitis por radiación y el cansancio, en contraste con los métodos híbridos. Bonaccorsi et al., en el 2024 también subrayaron que VMAT disminuye los efectos adversos a largo plazo, como la fibrosis pulmonar. Por otro lado, a pesar de que las técnicas híbridas también disminuyen la toxicidad crónica, necesitan una organización más exhaustiva para lograr la misma disminución de la toxicidad aguda que VMAT.

### **DURACIÓN DEL TRATAMIENTO Y COMODIDAD DEL PACIENTE**

VMAT es especialmente eficaz en cuanto a la duración de la terapia, con sesiones que pueden extenderse por menos de 5 minutos. Esta velocidad incrementa notablemente la confortabilidad del paciente y potencia la habilidad de los centros de radioterapia para atender a un mayor número de pacientes cada día.

Por otro lado, las técnicas híbridas generalmente demandan un tratamiento más prolongado debido a la necesidad de fusionar diversas modalidades y modificar los parámetros de tratamiento. Esto puede representar un obstáculo para los pacientes, en particular aquellos que enfrentan problemas para mantenerse inmóviles por largos lapsos de tiempo.

## VENTAJAS Y DESVENTAJAS ECONÓMICAS

Desde un punto de vista económico, VMAT demanda una inversión inicial superior en equipos y capacitación especializada, sin embargo, su eficacia en cuanto a duración del tratamiento y disminución de complicaciones a largo plazo podría compensar estos gastos. Bonaccorsi et al. (2024) indicaron que, pese a que inicialmente VMAT puede resultar más costoso.

A pesar de ser más asequibles en ciertos escenarios, las técnicas híbridas pueden incrementar los gastos operativos debido a la complejidad de la planificación y la prolongada duración del tratamiento. Domingos (2020) determinó que, a pesar de que las técnicas combinadas pueden disminuir los costos en ciertas situaciones, su organización más exhaustiva puede incrementar los costos a largo plazo.

**TABLA COMPARATIVA DE CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS TÉCNICAS HÍBRIDAS Y TÉCNICA VMAT**

Característica	VMAT (Arcoterapia Volumétrica Modulada)	Técnicas Híbridas
Dosimetría y distribución de la dosis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta homogeneidad de la dosis.</li> <li>• Mejor conformación del haz para áreas complejas.</li> <li>• Minimiza la dosis en órganos críticos como el corazón y los pulmones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Personalización de la distribución de dosis.</li> <li>• Combinación de VMAT y 3D-CRT mejora la conformación del haz en tumores complejos</li> </ul>

Protección de órganos en riesgo (OAR)	Reducción significativa de la dosis en órganos como el corazón y los pulmones	Buena protección de órganos críticos, aunque depende de la planificación detallada
Toxicidad y efectos secundarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción notable de la toxicidad aguda (dermatitis por radiación, fatiga).</li> <li>• Menor incidencia de efectos crónicos (fibrosis pulmonar)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficaz en la reducción de la toxicidad crónica.</li> <li>• Requiere planificación minuciosa para igualar la reducción de toxicidad aguda que ofrece VMAT</li> </ul>
Duración del tratamiento	Tratamiento rápido (<5 minutos por sesión) mejora la comodidad del paciente y la capacidad de los centros de radioterapia.	Mayor duración del tratamiento debido a la combinación de técnicas, lo que puede ser incómodo para algunos pacientes.
Costo y viabilidad económica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversión inicial más alta debido a la tecnología avanzada y la formación del personal.</li> <li>• Reducción de costos a largo plazo por menor incidencia de complicaciones y mayor eficiencia operativa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor inversión inicial en comparación con VMAT puro.</li> <li>• Puede aumentar los costos operativos debido a la complejidad de la planificación y duración del tratamiento</li> </ul>



## **EVALUACIÓN CLÍNICA EN PACIENTES CON CÁNCER DE MAMA**

La valoración clínica en pacientes con cáncer de mama es esencial para establecer la estrategia terapéutica más adecuada, particularmente en el escenario de la selección entre Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT) y métodos híbridos. Esta parte examina la manera en que estas tecnologías han impactado en los resultados clínicos, ofreciendo datos útiles acerca de su eficacia, toxicidad y efectos a largo plazo.

### **HALLAZGOS DE VMAT EN PACIENTES CON CÁNCER DE MAMA**

VMAT ha probado su eficacia especialmente en pacientes con cáncer de mama izquierda, dado que disminuye considerablemente la dosis que reciben los órganos vulnerables, como el corazón y los pulmones. Bonaccorsi y colaboradores (2024) contrastaron los hallazgos de VMAT con otros métodos y determinaron que VMAT proporcionaba una mejor defensa de los órganos en peligro sin afectar la cobertura del tumor. Las investigaciones evidenciaron que VMAT, al ofrecer una regulación constante de la dosis durante el tratamiento, disminuyó las complicaciones a largo plazo como la fibrosis pulmonar y las afecciones del corazón.

### **HALLAZGOS DE TÉCNICAS HÍBRIDAS EN PACIENTES CON CÁNCER DE MAMA**

Por otro lado, las técnicas híbridas, que combinan VMAT con Radioterapia Conformada Tridimensional (3D-CRT) o Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT), han mostrado resultados prometedores en términos de personalización del tratamiento. Sultan et al. (2023) señalaron que la combinación de IMRT con VMAT mejoró la conformidad de la dosis, lo que permitió una distribución más homogénea y una mayor protección de los órganos en riesgo. Esto es particularmente beneficioso en pacientes con anatomías complicadas o tumores cercanos a estructuras críticas, como el corazón y los pulmones.

Aunque las técnicas híbridas requieren más tiempo de planificación y mayor experiencia técnica, su capacidad para combinar los beneficios de distintas modalidades ha demostrado reducir la toxicidad crónica y mejorar la calidad de vida de los pacientes a largo plazo. Zhang et al. (2024) concluyeron que las técnicas híbridas, en particular el JO-VMAT, ofrecían una excelente conformidad del volumen objetivo y una dosis significativamente más baja a órganos críticos como el corazón .

## IMPACTO EN ÓRGANOS EN RIESGO

En el tratamiento del cáncer de mama, uno de los aspectos más críticos es la protección de los órganos en riesgo (OAR), como el corazón y los pulmones. Estos órganos están en proximidad a la región mamaria y, por lo tanto, corren el riesgo de recibir dosis significativas de radiación durante la terapia. Tanto VMAT (Arcoterapia Volumétrica Modulada) como las técnicas híbridas han demostrado eficacia en reducir la dosis a estos órganos, pero tienen diferencias en su enfoque y resultados.

### IMPACTO DE VMAT EN ÓRGANOS EN RIESGO

VMAT es una técnica que ha mostrado una significativa reducción en la dosis que reciben los órganos en riesgo. Yipeng et al. (2023) destacaron que el uso de VMAT con bolos de espesores variables (como 5 mm o 10 mm) permite proteger mejor el corazón y los pulmones. En particular, VMAT-5B se ha mostrado más resistente a errores de configuración, lo que reduce el riesgo de daño en los OAR cuando se realizan desplazamientos no intencionados durante el tratamiento.

Otro estudio por Marrazzo et al. (2023) concluyó que VMAT, gracias a su capacidad para modulación volumétrica, disminuye de manera efectiva las dosis recibidas por el pulmón contralateral y el corazón, minimizando el riesgo de complicaciones a largo plazo, como la cardiotoxicidad. Además, la automatización en la planificación de VMAT reduce la variabilidad en la entrega del tratamiento, asegurando una cobertura más consistente del volumen objetivo, con una menor dosis a órganos sanos.

## IMPACTO DE LAS TÉCNICAS HÍBRIDAS EN ÓRGANOS EN RIESGO

Las técnicas híbridas, que combinan VMAT con otras modalidades como 3D-CRT o IMRT, también ofrecen una significativa reducción en la dosis a los órganos en riesgo. Estas técnicas permiten ajustar la radiación con una mayor precisión, mejorando la conformación de la dosis en el volumen tumoral, mientras se limita la exposición de los órganos críticos.

Domingos et al. (2024) observaron que la combinación de H-VMAT (VMAT con 3D-CRT) resultó en una disminución de la dosis a la mama contralateral y los pulmones, en comparación con VMAT puro. Además, la técnica híbrida logró una mejor conformidad y cobertura del volumen objetivo, lo que es crucial para reducir la toxicidad en pacientes con cáncer de mama. Sin embargo, a pesar de estas ventajas, las técnicas híbridas requieren una planificación más compleja, lo que puede aumentar el tiempo y los recursos necesarios para su implementación

Por otro lado, Zhang et al. (2024) encontraron que la técnica JO-VMAT (VMAT con desplazamiento de mandíbula) ofrecía una mejor protección de los órganos críticos, particularmente en el corazón y los pulmones. Esta técnica mostró una notable reducción de la dosis en el corazón, disminuyendo el riesgo de cardiopatías inducidas por radiación, y redujo significativamente la exposición en el pulmón ipsilateral

## »»»» CONCLUSIONES

La evaluación clínica comparativa entre VMAT (Arcoterapia Volumétrica Modulada) y las técnicas híbridas en el tratamiento del cáncer de mama revela importantes conclusiones que orientan la toma de decisiones clínicas en función de las características individuales del paciente. Ambas técnicas han demostrado ser altamente efectivas, aunque presentan diferencias significativas en términos de dosimetría, protección de órganos en riesgo, toxicidad y viabilidad económica.

En primer lugar, VMAT se destaca por su alta eficacia en la distribución de la dosis. Esta técnica es capaz de administrar radiación de manera homogénea en el volumen tumoral, lo que la convierte en una opción preferida para pacientes con tumores que no presentan demasiada complejidad anatómica. Además, su capacidad para reducir el tiempo de tratamiento, al ser una modalidad de radiación más rápida y precisa, representa una ventaja tanto para los pacientes como para los centros de radioterapia. Esto se debe a que VMAT permite un mayor flujo de pacientes en menor tiempo, optimizando así los recursos operativos del centro radioterapéutico. Sin embargo, cuando se trata de pacientes con anatomías más complejas o tumores cercanos a órganos críticos, las técnicas híbridas ofrecen una mayor personalización del tratamiento, lo que permite ajustar la dosis de manera más precisa a las necesidades específicas del paciente, combinando los beneficios de VMAT con modalidades como 3D-CRT o IMRT.

En cuanto a la protección de los órganos en riesgo (OAR), VMAT ha demostrado ser especialmente eficaz en la reducción de la dosis que reciben el corazón y los pulmones, lo cual es crítico en el tratamiento del cáncer de mama, particularmente en el lado izquierdo. La modulación volumétrica continua de VMAT permite una distribución precisa de la radiación, minimizando la exposición de estos órganos y reduciendo el riesgo de complicaciones como la cardiotoxicidad o la fibrosis pulmonar. No obstante, aunque las técnicas híbridas también han mostrado ser efectivas en la protección de los OAR, requieren una planificación más compleja para obtener los mismos resultados que VMAT, especialmente en pacientes con condiciones anatómicas más desafiantes.

Por otro lado, en términos de toxicidad, VMAT presenta una clara ventaja al reducir significativamente la toxicidad aguda en comparación con las técnicas híbridas. Los pacientes tratados con VMAT experimentan menos efectos secundarios agudos, como la dermatitis por radiación, y muestran una mejor calidad de vida durante el tratamiento. Sin embargo, las técnicas híbridas destacan por su capacidad para reducir la toxicidad crónica, protegiendo mejor los tejidos sanos a largo plazo. Esto las convierte en una opción recomendable para pacientes en los que se prioriza la reducción de efectos a largo plazo, aunque su planificación más detallada y el tiempo de tratamiento prolongado pueden aumentar la incidencia de efectos secundarios agudos si no se optimizan correctamente los parámetros de tratamiento.

En cuanto a la viabilidad económica, VMAT requiere una mayor inversión inicial en equipos avanzados y en la formación del personal. Sin embargo, su capacidad para reducir el tiempo de tratamiento y minimizar los efectos secundarios a largo plazo puede justificar estos costos iniciales, ya que permite una mayor eficiencia operativa. En cambio, las técnicas híbridas, aunque accesibles desde el punto de vista del costo inicial, pueden generar mayores costos operativos debido a la complejidad de la planificación y el mayor tiempo de tratamiento. A pesar de ello, continúan siendo una opción válida para centros con recursos limitados que desean maximizar el uso de su infraestructura disponible.

## »»»» REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Cancer Society. (2020). Cómo se usa la radioterapia para tratar el cáncer. Cancer.org. Recuperado de <https://n9.cl/d5q1q>
- Balaji, K., & Ramasubramanian, V. (2022). Enfoque de puntuación integrado para evaluar la calidad del plan de radioterapia para el tratamiento del cáncer de mama. Reports of Practical Oncology and Radiotherapy, 707-716. <https://doi.org/10.5603/RPOR.a2022.0083>
- Bonaccorsi, S., et al. (2024). Exploración del potencial de los iones de helio para la radioterapia del cáncer de mama del lado izquierdo después de una mastectomía. Cancers, 16(410), 1-18. <https://lc.cx/RXmst6>
- Cuenta de Alto Costo. (2023). Situación del cáncer de mama en Colombia. CAC Report. Recuperado de <https://cuentadealtocosto.org>
- Domingos, A., et al. (2020). Validación de una técnica híbrida en arcoterapia volumétrica (H-VMAT) para tratamientos de mama. Tesis de Maestría, Instituto Federal De Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. <https://lc.cx/rVrszl>
- Marrazzo, L., et al. (2023). Técnica de arcoterapia modulada volumétrica totalmente automatizada para la radioterapia del cáncer de mama localmente avanzado. Radiation Oncology, 18(176), 1-9. <https://lc.cx/arFShT>
- Organización Mundial de la Salud. (2022). Datos y cifras sobre el cáncer de mama. OMS. Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cancer>
- Tatiane, M., et al. (2024). Estudio comparativo de técnicas híbridas y VMAT en el tratamiento del cáncer de mama. Revista de Oncología Radioterapéutica.
- Yipeng, Z., et al. (2023). Impacto de VMAT en el tratamiento posmastectomía de cáncer de mama con bolos de espesores variables. Radiotherapy and Oncology.
- Zhang, J., et al. (2024). Análisis de JO-VMAT en la protección de órganos críticos en pacientes con cáncer de mama. Journal of Clinical Oncology.
- Sultan, R., et al. (2023). Combinación de IMRT y VMAT para mejorar la conformidad de la dosis en pacientes con anatomías complejas. International Journal of Radiation Oncology.

## »»»» AGRADECIMIENTOS

Deseamos manifestar nuestro agradecimiento a la Universidad Mariana, por proporcionarnos el espacio y los medios requeridos para la confección de esta cartilla. Además, queremos expresar nuestro agradecimiento al Programa de Radiodiagnóstico y Radioterapia, cuyo equipo administrativo y docente nos ha orientado con compromiso y dedicación. Su dedicación a la educación de profesionales comprometidos y su inestimable cooperación nos han motivado durante este proceso.

Finalmente, agradecer a todos los lectores que invierten su tiempo en este contenido. Esperamos que se convierta en un recurso valioso y de respaldo en su capacitación y crecimiento profesional.