

# Taquicardia ventricular recurrente: informe de tres casos de radioablación cardíaca

## Recurrent ventricular tachycardia: a case-series report of three cardiac radioablation

Gustavo Pozo Rodriguez<sup>1\*</sup>, Sandra Giselle Guardado Gonzalez<sup>2</sup>, Eduardo Cabello Murillo<sup>1</sup>, Pedro Adaimi Hernandez<sup>1</sup>, Raúl Díaz Fuentes<sup>1</sup>, Ana Isabel Milanés Gaillet<sup>1</sup>, Angel Gaitan Simon<sup>1</sup>, Marta Manzano Rodriguez<sup>1</sup>, Paloma Botella Faus<sup>1</sup>, Daniel Rojo Navarrete<sup>1</sup>, Jose Perez-Regadera Gomez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Servicio de Radiofísica Hospitalaria del HU 12 de Octubre de Madrid.

<sup>2</sup> Servicio de Oncología Radioterápica del HU 12 de Octubre de Madrid.

Fecha de Recepción: 24/01/2023 - Fecha de Aceptación: 09/10/2023

Este informe recoge los parámetros más relevantes que pueden influir en el resultado final de los tratamientos de ablación cardíaca con radioterapia tratados en nuestra institución hasta la fecha desde 2021. Dichos parámetros están relacionados con el estado general y comorbilidades del paciente, definición del CTV objetivo, inmovilización, IGRT y plan de tratamiento.

**Palabras clave:** Radiocirugía cardíaca, radioablación cardíaca, taquicardia ventricular, SBRT, supervivencia global.

This report includes the most relevant parameters that can influence the final result of cardiac ablation treatments with radiotherapy treated at our institution since 2021 to date. These parameters are linked to patient comorbidity, CTV definition, immobilization, IGRT and treatment plan.

**Key words:** Cardiac radiosurgery, cardiac radio ablation, ventricular tachycardia, SBRT, overall survival.

## Introducción

La taquicardia ventricular (*'Ventricular Tachycardia'*, VT) se origina principalmente a partir de cicatrices miocárdicas procedentes de infartos que forman áreas arritmogénicas activando el miocardio de tejido normal.

En el manejo de estos pacientes suelen emplearse en primera instancia fármacos antiarrítmicos, implantes desfibriladores (ICD) o, si estos fracasan, la realización de procedimientos de ablación por radiofrecuencia mediante cateterismo (*'Catheter Ablation'*, CA).<sup>1-3</sup>

El blanco de tratamiento con CA es el área circundante a la cicatriz. Una manera de mapear la zona para definir el área de tratamiento es durante el episodio de VT, pero eso entraña cierto compromiso hemodinámico del paciente.

En su lugar, se procede al mapeado electroanatómico (*'Electroanatomical mapping'*, EAM). Con la

EAM, se identifican zonas de electrogramas anormales y señales de baja amplitud. Una vez definida el área objetivo, se procede a eliminar el tejido arritmogénico mediante CA.<sup>1</sup>

La radioterapia representa una opción terapéutica bien cuando el acceso mediante CA es difícil, bien cuando fracasa el control con los fármacos antiarrítmicos y la CA es ineficaz, lo que se conoce como VT refractaria. La radioablación cardíaca (*'Radioablation-Cardiac Radiosurgery'*, RA/CRS) es una técnica no invasiva y su éxito depende en gran medida de la definición del CTV y su transferencia al CT de planificación.<sup>1-3</sup>

Es importante señalar que, paralelamente al fracaso farmacológico o de la CA, muchos pacientes no tolerarían nuevas intervenciones tan prolongadas. Más aún, los pacientes que se someten a CA tienen un 5% de probabilidad de muerte en los primeros 30 días

\*Correspondencia: gustavo.pozo@salud.madrid.org

<https://doi.org/10.37004/sefm/2023.24.2.003>

posteriores a la CA,<sup>2</sup> y el 50% seguirán presentando arritmias recurrentes con posterioridad.<sup>2,4</sup>

## Material y métodos

Se establecieron como criterios de inclusión para el tratamiento con RA/CRS aquellos pacientes con VT recurrentes en los que no hay respuesta farmacológica ni la CA resulta efectiva, además de no existir otras alternativas terapéuticas, recogiendo los parámetros y datos más representativos para un total de tres tratamientos.

Los pacientes fueron tratados en un acelerador lineal Varian EDGE, que cuenta con un colimador multilaminas de alta definición, sistema de monitoreo respiratorio y una mesa de tratamiento con 6 grados de libertad. Durante el tratamiento, el equipo de cardiología estuvo presente en la sala para abordar cualquier eventual emergencia relacionada con el paciente.

Para tener en cuenta la incertidumbre asociada al movimiento respiratorio, se empleó la modalidad de imagen 4DCT adquirida con el CT Philips Brilliance Big Bore. Adicionalmente, para una adecuada definición del sustrato generatriz de VT, fue necesario hacer uso del EAM, adquisición de CT con sincronización cardíaca y reconstrucción retrospectiva para verificar el estado de las arterias coronarias y resonancia magnética (MRI) para el estudio funcional de ambos ventrículos mediante secuencias eco de gradiente (*'Balance Fast*

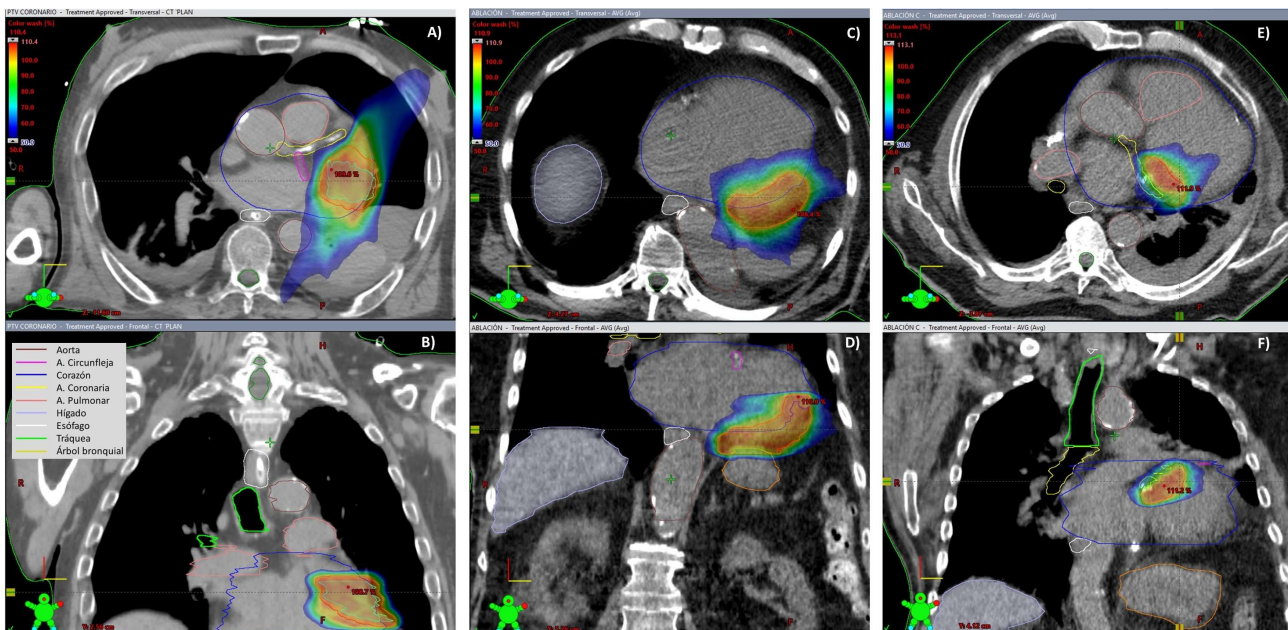
*Field Echo*'). Este sustrato representará el CTV sobre el 4DCT promediado empleado para el cálculo del tratamiento; a este CTV se le realizó una expansión anisótropa adaptada a cada caso y consensuada por el equipo multidisciplinar (cardiólogo, oncólogo y radiofísico) para definir el PTV.<sup>1-3,5</sup> Para el registro deformable se empleó la herramienta de deformación de múltiples pasadas (*'β-spline'* elástico multiresolución)<sup>6</sup> de Velocity v.4.1, mientras que para la segmentación y transferencia de estructuras al CT de planificación se utilizó Eclipse Contouring v.15.5.<sup>5-8</sup>

El control de calidad de los planes fue realizado mediante dosimetría portal y con el detector de alta resolución Mapcheck (Sun Nuclear), con una rejilla de diodos tipo N-Si, espaciado de 2.47 mm y área sensible de 0.48 × 0.48 mm<sup>2</sup> y en la que se emplearon los criterios de aceptación gamma 3%/3 mm y 2%/2 mm respectivamente para un mínimo del 95% de los puntos.<sup>9</sup>

## Resultados

Los datos recogidos han sido clasificados en cuatro bloques según se muestra en las Tablas 1, 2 y 3: Antecedentes del Paciente, Volumen de Tratamiento, Parámetros de Tratamiento y Resultado del Tratamiento.

La edad promedio de los pacientes fue de 76.7 años, todos ellos varones, fracción de eyección promedio de 41.7% (un corazón sano la tendría en el



**Fig. 1.** Representación de las distribuciones de dosis en los pacientes 1, 2 y 3 con cota mínima en el 50% de la dosis de prescripción. A) y B): Vista axial y coronal del paciente 1, cuya lesión está próxima a las arterias circunfleja y coronaria. C) y D): Vista axial y coronal del paciente 2, en las que se aprecia la proximidad de la zona de tratamiento a la aorta descendente y el solapamiento con el estómago. E) y F): Vista axial y coronal del paciente 3, donde el PTV solapa con la rama circunfleja.

**Tabla 1.** Antecedentes del paciente. (a): años; ICD: implante desfibrilador; FEVI: Fracción de eyección del ventrículo izquierdo; V/M: Varón/Mujer; S/N: sí/no.

		Pacientes			
		1	2	3	
<b>Antecedentes del paciente</b>	<i>Beta bloqueantes</i>	Metoprolol (200mg/día)	Esmolol (perfusión)	Bisoprolol (10mg/día)	
	<i>Anti-arrítmicos</i>	Mexiletina (600mg/día)	.	Mexiletina (600mg/día)	
	<i>Anti-hipertensivos</i>	.	.	.	
	<i>Diureticos</i>	.	.	.	
	<i>Edad</i>	(a)	73	80	77
	<i>Sexo</i>	(V/M)	V	V	V
	<i>Número de CA previas</i>		1	4	1
	<i>ICD</i>	(S/N)	N	N	S
<i>Distancia mínima ICD-PTV</i>	(cm)	.	.	9.0	
<i>FEVI (%)</i>		42	43	.	

intervalo 50%-70%) y con tratamiento farmacológico y CA previas.

Solo el paciente 3 tenía un ICD expuesto durante la irradiación. En nuestro caso, la  $D_{max}$  estimada recibida durante el tratamiento fue de 4.0 cGy, para un haz de energía 10 MV-FFF. Este paciente falleció a los 18 días, no registrándose en ese corto periodo anomalías funcionales en el dispositivo ICD.

En relación al volumen de tratamiento, el PTV se generó a partir de una expansión anisótropa del CTV que osciló entre los 3-8 mm (mediana 4 mm). La mayor asimetría en los márgenes correspondió al paciente 2 debido a la proximidad con el estómago (apreciable en la Fig.1) y el riesgo de toxicidad asociado.<sup>11</sup>

A pesar de tener un volumen de PTV significativamente menor que el de los pacientes 1 y 2 (24.2 vs. 71.1 y 97.6 cm<sup>3</sup>)<sup>3,11</sup> el paciente con la localización más comprometida fue el 3, con una lesión próxima a la rama circunfleja que limitó la expansión del CTV a un valor promedio de 3.3 mm y que obligó a contener la dosis máxima alcanzada en el PTV a  $D_{max} = 22.54$  Gy, admisible en el caso de compromiso en tejido sano.<sup>2,12</sup>

Sobre el haz de radiación, la elección de energía sin filtro aplanador permitió obtener la tasa máxima de dosis (2400 UM/min) y por tanto optimizar el tiempo de tratamiento debido al estado general de este tipo de pacientes.<sup>4,9,13</sup> El tiempo promedio de tratamiento (incluida IGRT) registrado para los tres pacientes fue de 16.4 min (mín. 14.0 min, máx. 18.2 min).

Los parámetros dosimétricos registrados (tabla 2) fueron seleccionados a partir de las publicaciones existentes sobre RA/CRS y las recomendaciones del documento ICRU Report 91,<sup>10</sup> a fin de poder contrastar los valores recogidos.

Los índices de conformidad obtenidos fueron de 1.276, 1.182 y 1.745 para los pacientes 1,2 y 3 respectivamente. El paciente 2 muestra un decaimiento más pronunciado de la dosis fuera del PTV con un  $IG = 4.145$  (un 22.0% y un 23.4% menor que los pacientes 1 y 3 respectivamente), coherente con la exigencia de minimizar la toxicidad en estómago. Con esa misma finalidad, en el paciente 3 se limita la  $D_{max}$  en el CTV a 22.54 Gy para evitar daños vasculares.<sup>2</sup>

El factor de modulación, también llamado en la literatura factor IMRT, se expresa en la Tabla 2 como la razón entre las unidades monitor totales y la dosis de prescripción (MU/cGy), siendo valores típicos para haces de 10 MV-FFF en torno a 2.5-3.0 MU/cGy para tratamientos de SBRT y SRS.<sup>14,15</sup> A fin de reducir toxicidad, el tratamiento del paciente 2 se diseñó con 3 arcos de 360°; esa misma demanda de conformación hace que el factor de modulación se eleve hasta los 5.1 MU/cGy frente a los 2.7 y 2.0 MU/cGy de los pacientes 1 y 3.

Los resultados de los tres tratamientos presentaron en común un mantenimiento inicial de los fármacos (ver tabla 3), si bien se fueron ajustando a dosis efectivas más bajas a lo largo del tiempo, salvo en el paciente 3 cuya enfermedad cardíaca severa no permitió que la acción de la RA/CRS revirtiese su estado.

El paciente 1 falleció a los 8.7 meses. El tratamiento se realizó bajo condiciones críticas vitales, precisando soporte farmacológico intrahospitalario durante 41 días post-RA/CRS. Después del alta médica, rehusó la rehabilitación y continuidad de cuidados. El paciente 2 permanece vivo tras 16 meses posterior al tratamiento radioterápico. Como posible signo clínico de toxicidad aguda, en las primeras 48h post-RA/CRS se le practican dos cardioversiones eléctricas. Superado ese

**Tabla 2.** Volumen y parámetros del tratamiento. \*CT sincronizado con el electrocardiograma. \*\*Tomados según su definición en ICRU Report N°. 91.<sup>10</sup>

		<i>Pacientes</i>			
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
<b>Volumen de tratamiento</b>	<b>Localización</b>	Próximo a coronaria izq.	Próximo a estómago	Próximo a circunfleja	
	<b>4DCT</b>	núm. fases	10	10	10
	<b>CT - espesor de corte</b>	(mm)	2	2	2
	<b>Inmovilización</b>		Colchón de vacío	Colchón de vacío	Colchón de vacío
	<b>Mapeado Electroanatómico</b>	(EAM)	Carto 3 System (Biosense Webster)	Carto 3 System (Biosense Webster)	Carto 3 System (Biosense Webster)
	<b>CT sinc. ECG* / MRI</b>	(S/N)	S/S	S/S	S/S
	<b>PTV vol</b>	(cm <sup>3</sup> )	71.1	97.6	24.2
	<b>Dosis de prescripción total - Sesión única</b>	(Gy)	25	25	25
	<b>Márgenes - expansión CTV a PTV (mm)</b>	lat	4/4	7/7	4/4
		long	4/4	7/3	3/3
vert		4/4	8/6	3/3	
<b>Parámetros de tratamiento</b>	<b>Sistema de Planificación de Tratamiento y Parámetros del haz.</b>	<b>Software</b>	Eclipse 15.6 (Varian)	Eclipse 15.6 (Varian)	Eclipse 15.6 (Varian)
		<b>Algoritmo</b>	Acuros 15.6	Acuros 15.6	Acuros 15.6
		<b>Rejilla de cálculo (mm)</b>	1.25	1.25	1.25
		<b>Energía del haz (MV)</b>	10FFF	10FFF	10FFF
		<b>MLC</b>	High Definition 120	High Definition 120	High Definition 120
		<b>Seguim. de mordazas</b>	Activo	Activo	Activo
		<b>Tasa máxima de dosis (MU/min)</b>	2400	2400	2400
		<b>Técnica</b>	RapidArc -VMAT	RapidArc -VMAT	RapidArc -VMAT
		<b>núm. de arcos completos</b>	2	3	2
		<b>Máximo MU/°</b>	60	60	60
	<b>Parámetros Dosimétricos**</b>	<b>D<sub>MAX,CTV</sub> (Gy)</b>	27.61	27.27	22.54
		<b>D<sub>95,CTV</sub> (Gy)</b>	25.05	24.1	19.6
		<b>Isodosis de prescripción</b>	90.50%	91.70%	110.90%
		<b>Índice de Paddick</b>	0.783	0.846	0.573
		<b>Índice de conformidad</b>	1.276	1.182	1.745
		<b>Índice de Gradiente</b>	5.311	4.145	5.409
		<b>MU totales</b>	6675	12650	4975
		<b>MU/cGy</b>	2.7	5.1	2.0
		<b>Mínima distancia ICD-PTV (cm)</b>	.	.	9.00
		<b>D<sub>MAX,ICD</sub> (cGy)</b>	.	.	4.0
<b>IGRT</b>	<b>Previo tratamiento</b>	KVCBCT	KVCBCT	KVCBCT	
	<b>Post tratamiento</b>	KVCBCT	KVCBCT	KVCBCT	
<b>Control Respiratorio (Varian RPM)</b>	<b>Sólo monitoreo</b>	no	sí	sí	
	<b>Sincronizado</b>	no	no	no	
<b>Tiempo total de tratamiento</b>	(min)	18.2	17.1	14.0	



**Tabla 3.** Resultado del tratamiento. Los fármacos que recoge la tabla son los administrados tras finalizar el tratamiento. Sus dosis se fueron reduciendo progresivamente con posterioridad en los pacientes 1 y 2.

		Pacientes			
		1	2	3	
<b>Resultado del tratamiento</b>	<i>Beta bloqueantes</i>	Metoprolol (200mg/día)	Esmolol (perfusión) Bisoprolol (5mg/día)	Bisoprolol (10mg/día)	
	<i>Anti-arritmicos</i>	Amiodarona (200mg/día) Mexiletina (300mg/día)	Mexiletina (300mg/día)	Amiodarona (200mg/día) Mexiletina (600mg/día)	
	<i>Anti-hipertensivos</i>	Eplerenona (25mg/día)	.	.	
	<i>Anticoagulantes</i>	.	Eliquis (10mg/día) Plavix (75mg/día)	.	
	<i>Diureticos</i>	Furosemida (40mg/día)	.	.	
	<i>Anestésicos</i>	.	.	Lidocaina	
	<b>Acciones adicionales</b>	ICD bicameral post RT			
	<b>Supervivencia global (OS)</b>	(meses)	8.7	16.0	0.6
	<b>Vivo</b>		no	sí	no
	<b>Causa del fallecimiento</b>		Enfermedad cardíaca	.	Enfermedad cardíaca
<b>Toxicidad Aguda</b>	<48h	Taquicardia	Taquicardia. 2 cardioversiones.	Taquicardia	
	>48h			VT refractaria	
<b>Efectos / Toxicidad Tardía</b>		.	.	.	

periodo, se estabiliza y se da el alta, sin más incidencias sobre su ICD. Dos semanas después se procede a un nuevo implante ICD bicameral. Por último, el paciente 3 sobrevivió 18 días como consecuencia de su propia enfermedad cardíaca de base (ver tabla 3).

## Discusión

Los volúmenes de tratamiento fueron adaptados a cada caso particular. Como referencias, Lydiard et al.<sup>12</sup>

recoge en su revisión un margen promedio de 5 mm (1-8 mm) para aceleradores de gantry 'tipo C', mientras que Chin et al.<sup>3</sup> reporta en su estudio retrospectivo una expansión entre 6 y 8 mm.

Para la elección de la energía del haz se consideraron ciertos aspectos de los ICD. Estos dispositivos están basados en tecnología CMOS, y además de las funciones comunes de un marcapasos, son lo suficientemente sensibles como para detectar y reaccionar frente al inicio de una taquicardia o en caso de fibrilación ventricular. Sin embargo, son más sensibles

a la radiación ionizante y a la generación indeseada de pares electrón-hueco. Mitfen et al.<sup>16</sup> advierten además de la probabilidad de alteración de la RAM de estos dispositivos debido a la radiación de alta LET ( $> 0.6 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ), referido a un daño de naturaleza estocástica que no necesita de un efecto acumulativo. El riesgo de daño funcional reportado para energías generadoras de neutrones (15-18 MV) se encuentra entorno al 12-29%, por lo que es recomendable evitar el empleo de protones y limitar la energía de fotones a 10 MV o menor.

Para la prevención de daños sobre el ICD, los casos reportados en la literatura no esclarecen qué partes del dispositivo pueden ser más sensibles, de manera que se tomó como referencia la  $D_{\text{max}}$  en cualquier parte del dispositivo exceptuando cables.<sup>16,17</sup>

Partiendo de la experiencia en nuestra institución, se compararon los valores del índice de conformidad (IC) e índice de gradiente (IG) asociados a 143 tratamientos de SBRT de pulmón con los índices calculados para las tres RA/CRS. Para los tratamientos de SBRT, IC = 1.142 con un intervalo de confianza del 95% [1.131,1.153] e IG = 4.715 e intervalo de confianza del 95% [4.564,4.866]. Los valores correspondientes mostrados en la tabla para la técnica RA/CRS no entrarían dentro de ese intervalo de confianza aun siendo próximos.

En referencia a este aspecto, Chin et al.<sup>3</sup> recoge en su estudio retrospectivo un IC = 1.0-1.2, cercano a lo obtenido con los pacientes 1 y 2. Si bien es cierto que los volúmenes de tratamiento de la RA/CRS son mayores y más anisótropos, en este trabajo se consideró interesante la comparativa con los resultados obtenidos en nuestra institución para los tratamientos de SBRT de pulmón, debido a que en principio existe un paralelismo en gran parte de los parámetros (protocolo de adquisición de imágenes, IGRT, inmovilización del paciente, hipofraccionamiento a altas dosis por sesión y estrategias de optimización del gradiente de dosis fuera del PTV. Los resultados mostraron (a falta de seguir aumentando la estadística de pacientes) que dosimétricamente las condiciones de los tratamientos de RA/CRS son más desfavorables que en la SBRT de pulmón.

Cuculich et al.<sup>4</sup> reportan un tiempo de tratamiento medio de 14 min (rango de 11-18 min), compatible con Chin et al.<sup>3</sup> para aceleradores 'tipo C'. Knutson et al.<sup>9</sup> observan en su estudio de 16 pacientes una reducción en el tiempo de tratamiento cuando comparan las RA/CRS empleando haces con y sin filtro aplanador sin penalizar la calidad del plan, lo que confirma la idoneidad del empleo de la tasa de 2400 MU/min en nuestro servicio.

Relativo al resultado de los tratamientos, Robinson et al.<sup>18</sup> reportan en el estudio ENCORE-VT sobre 19 pacientes una supervivencia global a un año del 72%

y a dos años del 58%, y subrayan la aparición de efectos adversos severos tardíos (posterior a 6 meses) tales como efusión pericárdica grado 3 o fístula gastropericárdica grado 4 posiblemente relacionados con la radioterapia y de aparición posterior a 2 años.

La baja supervivencia global del paciente 3 (18 días) parece estar ligada a la propia enfermedad cardíaca, evidenciando un tiempo insuficiente para establecer la eficacia del tratamiento radioterápico. Este tipo de pacientes con pequeño volumen de PTV tendrán en general (salvo casos particulares de enfermedad basal severa) mejor pronóstico debido a una menor probabilidad de pericarditis o neumonitis.<sup>11,19</sup>

## Conclusiones

A pesar de los pocos pacientes tratados hasta la fecha, la RA/CRS es una técnica factible, segura y en consonancia con las publicaciones actuales en nuestra institución, a falta de tener un número suficiente de tratamientos para poder hablar de significancia estadística.

Las toxicidades tardías en las irradiaciones torácicas a dosis tales como las empleadas en la RA/CRS son todavía poco conocidas.<sup>20</sup> Resulta por ello prudente extremar la optimización en términos de la definición del CTV, su expansión y la reducción de toxicidad en sus proximidades.<sup>21</sup>

Hasta la fecha, todavía no existe una herramienta comercial para transferir la información de los mapas electroanatómicos a los CT de planificación, lo que introduce una componente de incertidumbre humano-dependiente: una inadecuada definición de la zona a tratar tendrá una fatal trascendencia. Por tanto, esta actividad exige la participación de diversas disciplinas, el apoyo en las distintas modalidades de imagen y el consumo de un tiempo suficiente para la toma de referencias anatómicas y segmentación.

La elección de haz sin filtro 10FFF resulta adecuada para nuestros propósitos y posibilita la máxima tasa de dosis (2400 UM/min) a fin de optimizar el tiempo de tratamiento. Una medida de mejora a valorar sería la de optimizar el factor de modulación para reducir los tiempos de tratamiento siempre que no exista perjuicio significativo de la calidad del plan.

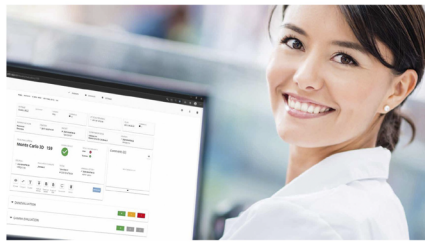
## Bibliografía

1. Boda-Heggemann J., Blanck O. et al. Interdisciplinary clinical target volume generation for cardiac radioablation: Multicenter benchmarking for the RAdiosurgery for VENTricular TACHycardia (RAVENTA) trial. *Int J Oncol Biol Phys j. ijrobp.* 2021.01.028. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2021.01.028>

2. Blanck O., Buergy D. et al. Radiosurgery for ventricular tachycardia: preclinical and clinical evidence and study design for a German multi-center multi-platform feasibility trial (RAVENTA). *Clin Res Cardiol*. 2020. 109:1319–1332. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00392-020-01650-9>
3. Chin R., Hayase J. et al. Non-invasive stereotactic body radiation therapy for refractory ventricular arrhythmias: an institutional experience. *J Interv Card Electrophysiol*. 2021 Sep;61(3):535-543. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10840-020-00849-0>
4. Cuculich, P., Schill M. et al. Non-invasive Cardiac Radiation for Ablation of Ventricular Tachycardia. *NEJM*. 2017. 377:2325-2336. DOI: <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1613773>
5. Brownstein J., Afzal M. et al. Method and Atlas to Enable Targeting for Cardiac Radioablation Employing the American Heart Association Segmented Model. *Int J Oncol Biol Phys*. 2021. 111(1), 178-185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2021.03.051>
6. Pukala J, Johnson PB et al. Benchmarking of five commercial deformable image registration algorithms for head and neck patients. *J Appl Clin Med Phys*. 2016 May 8;17(3):25-40. DOI: <https://doi.org/10.1120/jacmp.v17i3.5735>
7. Milo M., Offersen B. et al. Delineation of whole heart and substructures in thoracic radiation therapy: National guidelines and contouring atlas by the Danish Multidisciplinary Cancer Groups. *Radiother Oncol*. 2020 Sep;150:121-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2020.06.015>
8. Feng M., Moran JM. et al. Development and validation of a heart atlas to study cardiac exposure to radiation following treatment for breast cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2011 Jan 1;79(1):10-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2009.10.058>
9. Knutson NC, Samson PP et al. Radiation Therapy Workflow and Dosimetric Analysis from a Phase 1/2 Trial of Noninvasive Cardiac Radioablation for Ventricular Tachycardia. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2019 Aug 1;104(5):1114-1123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2019.04.005>
10. Wilke L., Andratschke N. et al. ICRU report 91 on prescribing, recording, and reporting of stereotactic treatments with small photon beams : Statement from the DEGRO/DGMP working group stereotactic radiotherapy and radiosurgery. *Strahlenther Onkol*. 2019 Mar;195(3):193-198. English. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00066-018-1416-x>
11. Jumeau R., Ozsahin M. et al. Stereotactic Radiotherapy for the Management of Refractory Ventricular Tachycardia: Promise and Future Directions. *Front Cardiovasc Med*. 2020 Jun 25;7:108. DOI: <https://doi.org/10.3389/fcvm.2020.00108>
12. Lydiard P., Blanck O. et al. A Review of Cardiac Radioablation (CR) for Arrhythmias: Procedures, Technology, and Future Opportunities. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2021 Mar 1;109(3):783-800. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2020.10.036>
13. Robinson CG, Samson PP et al. Phase I/II Trial of Electrophysiology-Guided Noninvasive Cardiac Radioablation for Ventricular Tachycardia. *Circulation*. 2019 Jan 15;139(3):313-321. DOI: <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.118.038261>
14. Ong CL., Verbakel WF. et al. Fast arc delivery for stereotactic body radiotherapy of vertebral and lung tumors. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2012 May 1;83(1):e137-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2011.12.014>
15. Manger R., Yock A. et al. Monitor Unit-Efficient Planning for Stereotactic Body Radiation Therapy and Stereotactic Radiosurgery. Poster Viewing Abstract, V.96, Issue 2, Supplement, E649-E650, October, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2016.06.2255>
16. Miften M., Mihailidis D. et al. Management of radiotherapy patients with implanted cardiac pacemakers and defibrillators: A Report of the AAPM TG-203†. *Med Phys*. 2019 Dec;46(12):e757-e788. doi: 10.1002/mp.13838.
17. Gauter-Fleckenstein B., Israel CW. et al. DEGRO/DGK. DEGRO/DGK guideline for radiotherapy in patients with cardiac implantable electronic devices. *Strahlenther Onkol*. 2015 May;191(5):393-404. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00066-015-0817-3>
18. Robinson C., Samson P. et al. Longer Term Results from a Phase I/II Study of EP-guided Noninvasive Cardiac Radioablation for Treatment of Ventricular Tachycardia (ENCORE-VT). *Int J Oncol Biol Phys*. 2019. 105(3):682-682. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2019.08.032>
19. Grimm J., LaCouture T. et al. Dose tolerance limits and dose volume histogram evaluation for stereotactic body radiotherapy. *J Appl Clin Med Phys*. 2011 Feb 8;12(2):3368. DOI: <https://doi.org/10.1120/jacmp.v12i2.3368>
20. Robinson CG, Samson PP et al. Phase I/II Trial of Electrophysiology-Guided Noninvasive Cardiac Radioablation for Ventricular Tachycardia. *Circulation*. 2019 Jan 15;139(3):313-321. DOI: <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.118.038261>
21. Le QT, Loo BW et al. Results of a phase I dose-escalation study using single-fraction stereotactic radiotherapy for lung tumors. *J Thorac Oncol*. 2006 Oct;1(8):802-9. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1556-0864\(15\)30409-3](https://doi.org/10.1016/S1556-0864(15)30409-3)

### VERIQA - The Modular Software Platform

For comprehensive Patient QA



Treatment plan visualization  
VERIQA module RT View



Treatment plan evaluation  
VERIQA module RT Evaluate



Pre-treatment verification  
VERIQA module RT MonteCarlo 3D



Pre-treatment and in vivo verification  
VERIQA module RT EPID 3D

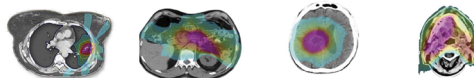
#### Your advantages

- ▶ One platform: From visualization and evaluation to verification and reporting. All in one modular platform, built on future-proof client-server architecture
- ▶ Take your workflow efficiency to a next level and automate your processes
- ▶ Track and analyse your results with the automated integration of Track-it
- ▶ Clinically proven, independent 3D dose verification tools and calculation algorithms for reliable results, independent of treatment complexity



### VERIQA RT MonteCarlo 3D

3D dose calculation with SciMoCa. Accurate. Fast. Automated.



	LUNG SBRT	Pancreas	Brain	Head and neck
	3D / 7 beams 6 MV FFF	VMAT / 2 arcs / 180 CP <sup>1</sup> 6 MV - SIB <sup>2</sup>	VMAT / 1arc / 90 CP <sup>1</sup> 6 MV FFF	VMAT / 2arc / 180 CP <sup>1</sup> 6 MV - SIB <sup>2</sup>
PTV volume	46.45 cm <sup>3</sup>	589.26 cm <sup>3</sup>	264.48 cm <sup>3</sup>	907.74 cm <sup>3</sup>
Dose grid size	3 x 3 x 3 mm	3 x 3 x 3 mm	2 x 2 x 2 mm	2 x 2 x 2 mm
MC accuracy	1 %	1 %	0.5 %	0.5 %
Calculation time	12 sec	30 sec	46 sec	246 sec

Calculated on a dual 12-core Intel Xeon Silver 4214 2.2 GHz server with hyperthreading (48 logical cores).



Discover VERIQA RT MonteCarlo 3D

#### Your advantages

- ▶ Monte Carlo simulations are the most accurate method for dose calculation in radiotherapy treatment planning. With its ability to simulate the physics of photons and charged particles transport through matter, Monte Carlo can accurately compute the dose under almost any circumstances
- ▶ VERIQA RT MonteCarlo 3D comes pre-installed on a powerful server, allowing for high-speed dose computations. Calculation results are available in less than 2 minutes
- ▶ Due to its specific beam modelling process, which is based on water phantom measurements, VERIQA RT MonteCarlo 3D performs truly independent dose calculations for a reliable secondary plan check



### VERIQA RT EPID 3D

True EPID dosimetry. Pre-treatment. In vivo. Fully automated.

#### Advanced 3D back-projection approach

\* For simplicity, the comparison of forward-projection and back-projection approach is explained using the example of in vivo EPID dosimetry. However, the same concept holds true for EPID-based pre-treatment dosimetry.

#### Forward approach\*

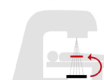
Current standard of commercial products



Treatment plan is used to predict EPID images. Measured EPID images are compared against predicted EPID images.

#### Back-projection approach\*

Used in VERIQA RT EPID 3D



EPID measured dose is back-projected into patient. Dose is reconstructed in patient anatomy and compared against planned dose.

Comparison level	EPID	Patient
Reference	Predicted EPID image/dose distribution	TPS
Visualization	2D only	3D
Comparison metrics	2D Gamma	3D Gamma, GVH, DVH
True composite (TC) as recommended by AAPM TG-218	✗	✓



Discover VERIQA RT EPID 3D

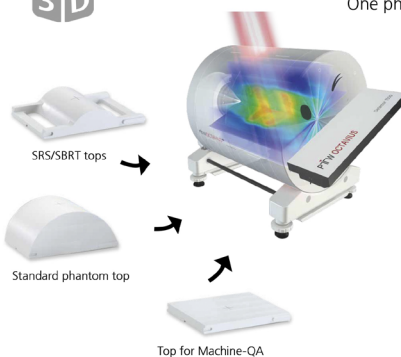
#### Your advantages

- ▶ Detect unnoticed clinically relevant errors during pre-treatment verification and quantitatively assess their dosimetric impact
- ▶ True 3D patient dosimetry: Compare the EPID-reconstructed dose directly to the planned patient dose as well as the calculation of patient dose-volume histograms (DVHs) for both pre-treatment and in vivo dosimetry
- ▶ Phantomless, efficient and fully automated
- ▶ Clinically proven back-projection algorithm: Successfully used at The Netherlands Cancer Institute - Antoni van Leeuwenhoek Hospital (NKI-AVL) in more than 75,000 patient treatments since 2005



### OCTAVIUS<sup>4D</sup>

One phantom - modular solutions for 4D patient and machine QA



TPS independent 3D dose



#### Detector modularity

Three different detectors covering a full range of applications: from simple treatment plans to complex stereotactic procedures.



Discover OCTAVIUS 4D Detector 1600SR5

#### Your advantages

- ▶ Time dependent and angular dependent dose measurement
- ▶ Synchronous phantom rotation with the linac gantry
- ▶ Detector array always perpendicular to the beam - no angular dependence
- ▶ Only 4D dose verification system that measures dose in the entire phantom volume
- ▶ Verification of treatments including non-coplanar beams, off-axis target volumes, large fields and treatment plans with multiple energies