

# Talamotomía VIM con MRgFUS en la Enfermedad de Parkinson: Eficacia, Seguridad y Técnica.

## VIM thalamotomy with MRgFUS in Parkinson's disease: Efficacy, safety and technique.

Raisa Braña Miranda<sup>1</sup>  , Francisco Rivera<sup>2</sup>, Nelson Ernesto Quintanal Cordero<sup>2</sup>, Fabián Piedimonte<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Neurology of Central Florida, Research Center.

<sup>2</sup>Fundación CENIT para la Investigación en Neurociencias. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Argentina.

Autor para correspondencia: Raisa Braña Miranda. Neurology of Central Florida, Research Center. Correo electrónico: raisabrana@gmail.com

Cómo citar: Braña Miranda R, Rivera F, Quintanal Cordero NE, Piedimonte F. Talamotomía VIM con MRgFUS en la Enfermedad de Parkinson: Eficacia, Seguridad y Técnica. NeuroTarget;19(1):48-54.

Recibido: 04-10-2024

Revisado: 09-01-2025

Aceptado: 12-03-2025

Publicado: 21-03-2025

Editor: Dr. Sergio Sacchettoni. 

### Resumen

**Introducción:** La talamotomía del núcleo ventral intermedio (VIM) mediante ultrasonido focalizado de alta intensidad guiado por resonancia magnética (MRgFUS) ha emergido como alternativa mínimamente invasiva para el temblor parkinsoniano refractario. Este estudio evalúa la eficacia, seguridad y parámetros técnicos de esta intervención en pacientes con enfermedad de Parkinson.

**Métodos:** Se realizó una revisión sistemática siguiendo directrices PRISMA. Se incluyeron estudios clínicos que evaluaron MRgFUS dirigido al VIM en enfermedad de Parkinson, con seguimiento mínimo de un mes. Se analizaron variables clínicas (reducción del temblor mediante CRST y MDS-UPDRS III, eventos adversos), técnicas (temperatura máxima, número de sonicaciones, coordenadas estereotácticas) y evolución tecnológica.

**Resultados:** Once estudios reportaron 97 pacientes tratados. Se observaron reducciones significativas en MDS-UPDRS III de 12.88 puntos a 1 mes, 12.10 a 3 meses, 14.85 a 6 meses y 20.65 a 12 meses en estado "on" medicación. Los efectos adversos fueron mayormente transitorios, incluyendo cefalea, mareos, alteraciones de la marcha y parestesias, con resolución espontánea en la mayoría de casos. Los parámetros técnicos variaron entre estudios, con coordenadas promedio de 6.90-9.08 mm anteriores a PC y 13.11-14.93 mm laterales desde línea media.

**Discusión:** MRgFUS presenta eficacia sostenida para el control del temblor parkinsoniano con perfil de seguridad favorable comparado con estimulación cerebral profunda. Los avances tecnológicos han optimizado la precisión y reducido complicaciones. La variabilidad en parámetros técnicos refleja la evolución tecnológica y necesidad de la individualización de la focalización del blanco.

**Conclusiones:** La talamotomía VIM con MRgFUS presenta eficacia sostenida para el control del temblor parkinsoniano con perfil de seguridad favorable comparado con estimulación cerebral profunda. Los avances tecnológicos han optimizado la precisión y reducido complicaciones, consolidando esta técnica como alternativa mínimamente invasiva en pacientes seleccionados.

**Palabras clave:** Enfermedad de Parkinson; temblor; talamotomía; VIM; ultrasonido focalizado; MRgFUS.

### Abstract

**Introduction:** Ventral intermediate nucleus (VIM) thalamotomy using magnetic resonance-guided focused ultrasound (MRgFUS) has emerged as a minimally invasive alternative for refractory parkinsonian tremor. This study evaluates the efficacy, safety, and technical parameters of this intervention in patients with Parkinson's disease.

**Methods:** A systematic review was conducted following PRISMA guidelines. Clinical studies evaluating VIM-targeted MRgFUS in Parkinson's disease with minimum one-month follow-up were included. Clinical variables (tremor reduction via CRST and MDS-UPDRS III, adverse events), technical parameters (maximum temperature, number of sonications, stereotactic coordinates), and technological evolution were analyzed.

**Results:** Eleven studies reported 97 treated patients. Significant MDS-UPDRS III reductions were observed: 12.88 points at 1 month, 12.10 at 3 months, 14.85 at 6 months, and 20.65 at 12 months in medication "on" state. Adverse effects were mostly transient, including headache, dizziness, gait disturbances, and paresthesias, with spontaneous resolution in most cases. Technical parameters varied between studies, with average coordinates of 6.90-9.08 mm anterior to PC and 13.11-14.93 mm lateral from midline.

**Discussion:** MRgFUS demonstrates sustained efficacy for parkinsonian tremor control with favorable safety profile compared to deep brain stimulation. Technological advances have optimized precision and reduced complications. Variability in technical parameters reflects technological evolution and the need for individualized targeting.

**Conclusions:** VIM thalamotomy using MRgFUS demonstrates sustained efficacy for parkinsonian tremor control with favorable safety profile compared to deep brain stimulation. Technological advances have optimized precision and reduced complications, establishing this technique as a minimally invasive alternative in selected patients.

**Keywords:** Parkinson's disease; tremor; thalamotomy; VIM; focused ultrasound; MRgFUS.

## Introducción

La enfermedad de Parkinson (EP) constituye uno de los trastornos neurodegenerativos más prevalentes, cuyo riesgo de aparición aumenta con la edad.<sup>1</sup> Sus manifestaciones clínicas incluyen síntomas motores, como bradicinesia, rigidez y temblor, junto con síntomas no motores, entre los que destacan la alteración del olfato, los trastornos cognitivos y las complicaciones psiquiátricas.<sup>2</sup> En conjunto, estas manifestaciones deterioran de manera significativa la calidad de vida de los pacientes y generan una elevada carga psicológica y sanitaria en sus familias.<sup>3</sup>

El tratamiento de primera línea en la EP se basa principalmente en el manejo farmacológico, que incluye agentes anticolinérgicos, agonistas dopaminérgicos y levodopa.<sup>4</sup> Si bien estas terapias proporcionan un control sintomático relevante y mejoran la calidad de vida, en pacientes con respuesta insuficiente o con efectos adversos marcados se considera la opción quirúrgica. En este contexto, la estimulación cerebral profunda (DBS, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como el abordaje quirúrgico más extendido, con intervenciones dirigidas al núcleo ventral intermedio del tálamo (VIM), el globo pálido interno (GPI) y el núcleo subtalámico (NST).<sup>5,6</sup> Esta modalidad resulta particularmente indicada en etapas avanzadas, cuando los tratamientos orales o transdérmicos ya no son eficaces.<sup>7</sup> No obstante, la DBS es un procedimiento invasivo y costoso, que implica la necesidad de implantación de electrodos intracerebrales, programación postoperatoria, y riesgo quirúrgico, lo que excluye a muchos pacientes con comorbilidades, edad avanzada o que rechazan intervenciones invasivas.<sup>6,8</sup>

En este marco, la técnica de ultrasonido focalizado guiado por resonancia magnética (MRgFUS, por sus siglas en inglés) ha emergido como una alternativa mínimamente invasiva que permite la ablación térmica de estructuras cerebrales específicas, como el VIM, el NST y el GPI, sin necesidad de radiación ni anestesia.<sup>9-12</sup> A diferencia de las cirugías invasivas tradicionales, MRgFUS reduce de manera significativa los riesgos de infección y hemorragia cerebral.<sup>13</sup> Su seguridad y eficacia han sido ampliamente documentadas en el tratamiento del temblor esencial,<sup>14,15</sup> aunque persisten interrogantes respecto a su utilidad en la EP, particularmente en el control del temblor parkinsoniano y en la mejoría de otros síntomas motores y no motores.

La literatura disponible sobre MRgFUS en la EP es todavía limitada. Las revisiones sistemáticas y metaanálisis publicados hasta el momento son escasos y con un número reducido de estudios incluidos.<sup>16-18</sup> No obstante, su incorporación a la práctica neuroquirúrgica requiere una comprensión profunda no solo de los beneficios clínicos, sino también de los parámetros técnicos utilizados (temperatura, energía, número de sonicaciones), la evolución de la plataforma Exablate Neuro y el perfil de seguridad asociado.

Esta revisión tiene como objetivo sintetizar la evidencia más

reciente sobre eficacia, seguridad, parámetros técnicos y evolución tecnológica de la talamotomía VIM mediante MRgFUS en la enfermedad de Parkinson, con énfasis en la aplicabilidad clínica, la precisión técnica y las proyecciones futuras del procedimiento.

## Método

### Diseño del estudio

Se realizó una revisión sistemática siguiendo las directrices PRISMA, con el objetivo de evaluar la eficacia, seguridad y parámetros técnicos de la talamotomía del núcleo ventral intermedio (VIM) mediante ultrasonido focalizado de alta intensidad guiado por resonancia magnética (MRgFUS) en pacientes con enfermedad de Parkinson.

### Criterios de elegibilidad

Se incluyeron estudios clínicos que evaluaron la eficacia del MRgFUS dirigido al VIM en pacientes con enfermedad de Parkinson, que reportaron medidas de seguridad y tolerabilidad del procedimiento y describieron parámetros técnicos relevantes, como temperatura máxima, número de sonicaciones y duración del procedimiento. Se consideraron ensayos clínicos controlados, estudios de cohorte prospectivos y series de casos con un mínimo de 3 pacientes, publicados en inglés o español, y con seguimiento mínimo de un mes. Se excluyeron revisiones sin datos originales, estudios que no diferenciaron enfermedad de Parkinson de temblor esencial, intervenciones combinadas no focalizadas, estudios preclínicos o en modelos animales, reportes de caso con menos de 3 pacientes, y publicaciones duplicadas o con datos superpuestos.

### Estrategia de búsqueda

Se realizó una búsqueda exhaustiva hasta octubre de 2024 en PubMed/MEDLINE, Embase, Scopus, Web of Science y ClinicalTrials.gov, empleando términos MeSH y palabras clave en inglés y español. Los términos principales incluyeron “Parkinson Disease” o “Enfermedad de Parkinson”, “Focused Ultrasound” o “Ultrasonido Focalizado” o “High-Intensity Focused Ultrasound” o “HIFU”, “VIM Thalamotomy” o “Talamotomía del VIM” o “Ventral Intermediate Nucleus”, y “MRgFUS” o “Magnetic Resonance-guided Focused Ultrasound”. La combinación de búsqueda utilizada fue: (“Parkinson Disease” OR “Enfermedad de Parkinson”) AND (“Focused Ultrasound” OR “MRgFUS” OR “High-Intensity Focused Ultrasound”) AND (“VIM Thalamotomy” OR “Ventral Intermediate Nucleus” OR “Talamotomía del VIM”).

### Selección de estudios

La selección de artículos se realizó en dos etapas: primero, cribado de títulos y resúmenes por dos investigadores independientes; posteriormente, análisis del texto completo de los artículos preseleccionados. Los desacuerdos se resolvieron

por consenso o mediante la consulta a un tercer revisor.

#### Extracción de datos

Se diseñó una plantilla estandarizada para la recopilación de variables clínicas, técnicas y de evolución tecnológica. Las variables clínicas incluyeron edad, sexo, duración de la enfermedad, reducción del temblor evaluada mediante escalas validadas como la Escala Clínica de Calificación del Temblor (CRST) y la sección III de la Escala Unificada para la Valoración de la Enfermedad de Parkinson (UPDRS III), duración del seguimiento y eventos adversos. Las variables técnicas incluyeron temperatura máxima alcanzada, número de sonicaciones, dosis térmica acumulada, duración total del procedimiento, coordenadas estereotácticas del VIM y plataforma tecnológica utilizada. La evolución tecnológica se evaluó considerando la generación de la plataforma Exablate Neuro, mejoras en control térmico y focalización, y avances en planificación y ejecución del procedimiento.

#### Evaluación de la calidad metodológica

Se evaluó la calidad de los estudios considerando tamaño de la muestra, duración del seguimiento, completitud de los datos y riesgo de sesgo. Esta valoración permitió contextualizar la solidez de la evidencia y guiar la interpretación de los resultados.

#### Síntesis de los datos

Dada la heterogeneidad de los estudios incluidos, se realizó un análisis descriptivo y cualitativo. Los datos cuantitativos se resumieron mediante medidas de tendencia central y dispersión cuando estuvieron disponibles. Se analizaron las relaciones entre parámetros técnicos, evolución tecnológica y resultados clínicos, enfatizando la relevancia práctica de cada hallazgo para la interpretación de eficacia y seguridad de MRgFUS en el tratamiento del temblor parkinsoniano.

#### Consideraciones éticas

Esta revisión se basó únicamente en estudios publicados, por lo que no requirió aprobación de comité de ética. Se respetaron las buenas prácticas en revisiones sistemáticas y los derechos de autor de las publicaciones incluidas.

### **Resultados**

Se identificaron 11 estudios que en conjunto reportaron 97 pacientes tratados por enfermedad de Parkinson mediante talamotomía unilateral o bilateral con ultrasonido focalizado de alta intensidad guiado por resonancia magnética (Tabla 1).

#### Eficacia clínica

Once estudios evaluaron la eficacia de MRgFUS dirigido al núcleo ventral intermedio (VIM) en un total de 97 pacientes con enfermedad de Parkinson, mostrando resultados consistentes en el control del temblor. Entre ellos, los trabajos de

Dahmani et al. (10 pacientes, seguimiento 1 año), Yin et al. (9 pacientes, seguimiento 1 año), Golfrè Andreasi et al. (10 pacientes, seguimiento 6 meses), Zaaroor et al. (9 pacientes, seguimiento 2 años) y Schlesinger et al. (7 pacientes, seguimiento 1 año), evidenciaron reducciones significativas en las puntuaciones de MDS-UPDRSIII tanto en estado “on” como “off” medicación. De manera similar, Wang et al. reportaron una disminución dramática en la CRST, de  $45.89 \pm 8.94$  a  $17.89 \pm 11.92$  al año post-tratamiento, mientras que Yin et al. documentaron una reducción al año de  $20 \pm 7.78$  a  $3.44 \pm 2.83$ . Estudios con seguimiento más corto, como Chen et al. (3 pacientes, 1 mes), Saporito et al. (18 pacientes, 6 meses), Stanziano et al. (15 pacientes, 3 meses), Iacopino et al. (4 pacientes, 3 meses) y Fasano et al. (3 pacientes, 6 meses), también mostraron mejoras consistentes en el control motor, especialmente en el componente de temblor.

La eficacia terapéutica de la focalización del VIM se mantuvo sostenida durante los períodos de seguimiento reportados. Los análisis agregados evidencian reducciones en la MDS-UPDRSIII de 12.88 puntos a 1 mes, 12.10 puntos a 3 meses, 14.85 puntos a 6 meses y 20.65 puntos a 12 meses en estado “on” medicación. Esta consistencia a lo largo del tiempo respalda la robustez del efecto clínico, subrayando que la ablación del VIM mediante MRgFUS ofrece mejoras significativas y sostenidas en pacientes con temblor parkinsoniano refractario. En conjunto, la evidencia confirma que el VIM constituye un blanco quirúrgico efectivo, con resultados clínicos que se mantienen a lo largo de períodos prolongados de seguimiento y con un perfil de eficacia reproducible en múltiples cohortes.

#### Seguridad y tolerabilidad

El análisis de los efectos adversos en los 11 estudios que utilizaron el VIM como blanco quirúrgico mostró un perfil de seguridad generalmente favorable, aunque asociado a complicaciones neurológicas propias del procedimiento. Chen et al. reportaron cefalea (n=1), mareos/vértigo (n=2) y dolor o sensación de calor en la cabeza (n=1), todos transitorios. Dahmani et al. documentaron a los 6 meses movimiento inflexible de la mano tratada y reacción lenta (n=1) y ligero temblor en la pierna tratada (n=1), con resolución completa de todos los efectos adversos a los 12 meses. Wang et al. observaron mareos leves (n=4) que se resolvieron en 24 horas, mientras que Yin et al. reportaron cefalea (n=1), mareos (n=2) durante el procedimiento y postoperatoriamente alteración de la marcha (n=3), entumecimiento de la punta de la lengua (n=4) e hipoguesia (n=1), la mayoría resolviéndose entre 1 y 12 meses. Golfrè Andreasi et al. no registraron efectos adversos graves en su cohorte de 10 pacientes.

Otros estudios reportaron complicaciones variables, pero generalmente transitorias. Zaaroor et al. documentaron ataxia de la marcha (n=1), mientras que Fasano et al. describieron dolor o ardor local transitorio (n=2), mareos (n=1), cefalea (n=1), disartria (n=1), debilidad del párpado (n=1) y, en casos

**Tabla 1.** Estudios seleccionados y eventos adversos

| Autor                                  | Año  | Número de Pacientes | Seguimiento | Eventos Adversos  |
|--|------|---------------------|-------------|---|
| Chen et al. <sup>(19)</sup>            | 2023 | 3                   | 1 mes       | Cefalea (n=1), mareos/vértigo (n=2), dolor/sensación de calor en cabeza (n=1), no persistieron en el seguimiento.   |
| Dahmani et al. <sup>(5)</sup>          | 2023 | 10                  | 1 año       | A los 6 meses: movimiento inflexible de mano tratada y reacción lenta (n=1), ligero temblor en pierna tratada (n=1). A los 12 meses todos los efectos adversos se resolvieron.  |
| Wang et al. <sup>(20)</sup>            | 2023 | 9                   | 1 año       | Mareos leves (n=4), se aliviaron en 24h.  |
| Saporito et al. <sup>(21)</sup>        | 2023 | 18                  | 6 meses     | No reportado  |
| Yin et al. <sup>(22)</sup>             | 2022 | 9                   | 1 año       | Durante el procedimiento: cefalea (n=1) y mareos (n=2). Postoperatorio: alteración de la marcha (n=3), entumecimiento de la punta de lengua (n=4), hipogeusia (n=1). La mayoría se resolvió antes de los 12 meses.                |
| Golfrè Andreasi et al. <sup>(23)</sup> | 2022 | 10                  | 6 meses     | No reportado  |
| Stanziano et al. <sup>(24)</sup>       | 2021 | 15                  | 3 meses     | No reportado  |
| Zaaroor et al. <sup>(9)</sup>          | 2018 | 9                   | 2 años      | Ataxia de la marcha (n=1). Otras complicaciones se discutieron junto con pacientes de temblor esencial  |
| Iacopino et al. <sup>(25)</sup>        | 2018 | 4                   | 3 meses     | No reportado  |
| Fasano et al. <sup>(26)</sup>          | 2017 | 3                   | 6 meses     | Dolor/ardor local transitorio (n=2), mareos (n=1), cefalea (n=1), disartria (n=1), debilidad del párpado (n=1). Persistentes: entumecimiento/parestesias (n=1) y hemiparesia (n=1).   |
| Schlesinger et al. <sup>(11)</sup>     | 2015 | 7                   | 1 año       | Durante el procedimiento: cefalea (n=3), mareos (n=2), vértigo (n=4), parestesias labiales (n=1). Postoperatorio: hipogeusia (n=1), sensación subjetiva de inestabilidad al caminar (n=1), alteración al caminar en tándem (n=1). |

persistentes, entumecimiento/parestesias (n=1) y hemiparesia (n=1). Schlesinger et al. reportaron cefalea (n=3), mareos (n=2), vértigo (n=4) y parestesias labiales (n=1) durante el procedimiento, y postoperatoriamente hipogeusia (n=1), sensación subjetiva de inestabilidad al caminar (n=1) y alteración al caminar en tándem (n=1), todos con resolución eventual. Tres estudios (Saporito et al., Stanziano et al. e Iacopino et al.) no proporcionaron datos específicos sobre efectos adversos. (Tabla 1)

#### Parámetros técnicos y evolución tecnológica

Se analizaron tres estudios en relación con los parámetros técnicos utilizados durante el procedimiento de MRgFUS dirigido al VIM, evidenciando variaciones significativas en las estrategias de focalización y en las dosis térmicas aplicadas. Ranjan et al. emplearon coordenadas de focalización tractográfica basadas en el VIM (T-VIM), localizadas 2.18 mm anteriores y 1.82 mm mediales respecto a las coordenadas indirectas del VIM que inicialmente se ubicaron 14 mm lateral a la línea media, 25% de la longitud AC-PC por delante del punto PC (aprox. 6–7 mm anterior), y 0–2 mm por encima del plano AC-PC, logrando que las lesiones

mostrarán una menor superposición con áreas asociadas a efectos adversos sensitivos. Este estudio demuestra que, al individualizar el target por tractografía, sistemáticamente se obtiene un desplazamiento anteromedial con respecto a la localización estereotáctica estándar. Kyle et al. reportaron que los pacientes con un blanco único recibieron un promedio de  $8.30 \pm 2.18$  sonicaciones totales dirigidas al VIM, de las cuales  $4.90 \pm 1.25$  fueron terapéuticas ( $>53^\circ\text{C}$ ), con una dosis térmica terapéutica acumulada (ATTD, por sus siglas en inglés) de  $287.53 \pm 73.80^\circ\text{C}$ ; en contraste, los pacientes con blanco dual recibieron  $7.80 \pm 1.97$  sonicaciones al VIM ( $3.78 \pm 1.37$  terapéuticas, ATTD:  $214.43 \pm 75.53^\circ\text{C}$ ) y  $4.73 \pm 1.49$  sonicaciones al área subtalámica posterior ( $1.93 \pm 0.47$  terapéuticas, ATTD:  $107.14 \pm 29.36^\circ\text{C}$ ). Por su parte, Bruno et al. emplearon una localización indirecta con coordenadas de  $7.47 \pm 0.46$  mm en el plano anteroposterior (AP),  $14.15 \pm 0.45$  mm en el plano laterolateral (RL) y  $1.15 \pm 0.46$  mm en el plano superoinferior (SI), requiriendo un promedio de  $3.2 \pm 1.94$  reposicionamientos desde las coordenadas iniciales para alcanzar beneficio clínico, con un desplazamiento promedio de 0.66 mm, 0.48 mm y 0.32 mm a lo largo de los planos RL, AP y SI, respectivamente. (Tabla2)

| <b>Tabla 2.</b> Coordenadas estereotácticas promedio del núcleo VIM del Tálamo |  |
|--|--|
| <b>Fuente</b>  | <b>Coordenadas reportadas</b>  |
| Ranjan et al. 2020 <sup>(27)</sup>   | Coordenadas indirectas finales: Anterior: $6.90 \pm 1.16$ mm desde PC; Lateral: $14.93 \pm 1.21$ mm desde línea media. T-VIM: Anterior: $9.08 \pm 1.96$ mm desde PC; Lateral: $13.11 \pm 2.23$ mm desde línea media. |
| Kyle et al. 2024 <sup>(28)</sup>   | Coordenadas VIM: 25% distancia AC-PC anterior a PC + 0.5-1 mm; 14 mm lateral desde línea media; supero-inferior ajustado por anatomía individual a partir del plano intercomisural.                                  |
| Bruno et al. 2021 <sup>(29)</sup>  | Coordenadas indirectas: AP: 25-30% distancia intercomisural anterior a PC; RL: 14 mm lateral desde línea media (o 11 mm desde pared tercer ventrículo); SI: 1-2 mm sobre la línea AC-PC.                             |

## Discusión

La talamotomía del núcleo ventral intermedio mediante MRgFUS representa un avance importante en el manejo de síntomas motores refractarios de la enfermedad de Parkinson, especialmente en pacientes con temblor dominante. En la revisión de la literatura se ha demostrado que la talamotomía mediante MRgFUS presenta eficacia clínica, con reducciones significativas en escalas validadas como UPDRS III y CRST en pacientes con enfermedad de Parkinson. Aunque la eficacia es ligeramente inferior a la observada con estimulación cerebral profunda, MRgFUS se asocia con un perfil de seguridad más favorable, evitando la necesidad de implantes intracraneales y permitiendo una recuperación más rápida. Los resultados de nuestra revisión sugieren que los eventos adversos asociados a MRgFUS son generalmente leves y transitorios, lo que favorece la elección de este tratamiento frente a la estimulación cerebral profunda.

El VIM actúa como un nodo central en la red cerebelo-tálamo-cortical, recibiendo proyecciones glutamatérgicas del cerebelo/núcleo dentado y estableciendo conectividad funcional con áreas motoras corticales, el globo pálido y el putamen, incrementándose dicha conectividad en correlación con la severidad del temblor en la enfermedad de Parkinson. La disfunción de esta red genera la actividad oscilatoria anómala responsable del temblor parkinsoniano, lo que fundamenta fisiopatológicamente la elección del VIM como blanco terapéutico mediante MRgFUS o DBS.<sup>30</sup> En cuanto a la elección del procedimiento para tratar a los pacientes con enfermedad de Parkinson, ambos procedimientos muestran una adecuada respuesta terapéutica tanto en las escalas de temblor como en las de calidad de vida. MRgFUS se asocia con una incidencia ligeramente mayor de efectos adversos neurológicos transitorios en comparación con DBS, mientras que este último presenta una mayor frecuencia de complicaciones relacionadas con el hardware y con la propia intervención quirúrgica.<sup>31</sup> Por ello, la selección del tratamiento debe individualizarse para cada paciente, considerando el estado clínico, la mejoría esperada, la idoneidad quirúrgica y otros factores relevantes. Los avances tecnológicos han optimizado la eficacia y seguridad de MRgFUS. La plataforma Exablate Neuro ha incorporado planificación tridimensional, algoritmos de control adaptativo y modelado térmico avanzado, mientras que la

monitorización térmica en tiempo real permite ajustar parámetros intraoperatorios y minimizar complicaciones.<sup>28</sup> Esta monitorización intraoperatoria de la temperatura durante cada sonicación permite un control preciso y personalizado para cada paciente. Asimismo, posibilita la evaluación clínica del paciente entre cada sonicación, permitiendo corroborar la presencia de efectos terapéuticos y la detección temprana de posibles eventos adversos. Por último, la evolución tecnológica ha permitido reducir la duración total del procedimiento, mejorar la precisión lesional y ofrecer tratamientos ambulatorios o de corta estancia, optimizando recursos hospitalarios y ampliando el acceso a esta terapia. Estos avances sugieren que MRgFUS podría integrarse de manera más amplia en la neurocirugía funcional, especialmente en centros con experiencia y protocolos estandarizados, y podrían combinarse con técnicas de neuromodulación en estudios futuros.

## Limitaciones

A pesar de estos hallazgos, la interpretación de los resultados está limitada por el tamaño reducido de las cohortes y la heterogeneidad metodológica de los estudios, muchos de los cuales son series de casos. La información sobre efectos adversos y parámetros técnicos no siempre se reporta de manera uniforme, y hay escasa evidencia comparativa entre abordajes bilaterales y unilaterales o entre diferentes fenotipos de la enfermedad de Parkinson. La ausencia de ensayos controlados aleatorizados y la falta de estandarización en medidas de resultado disminuyen la solidez de las conclusiones, subrayando la necesidad de estudios prospectivos multicéntricos con protocolos homogéneos y seguimiento prolongado.

## Conclusiones

La evidencia disponible indica que la talamotomía del núcleo ventral intermedio mediante MRgFUS constituye una intervención eficaz y reproducible para el control del temblor parkinsoniano refractario. Los estudios incluidos, que comprenden 97 pacientes, muestran mejoras sostenidas en escalas validadas como MDS-UPDRS III y CRST a lo largo de seguimientos de hasta dos años. El procedimiento presenta un perfil de seguridad favorable, siendo la mayoría de los eventos adversos neurológicos transitorios y de resolución espon-

tánea. La variabilidad en los parámetros técnicos refleja tanto la evolución tecnológica como la necesidad de individualizar la focalización del blanco, consolidando al MRgFUS como una alternativa mínimamente invasiva frente a intervenciones más complejas, como la estimulación cerebral profunda.

## Bibliografía

1. Kalia LV, Lang AE. Parkinson's disease. *Lancet*. 2015;386:896–912. doi: 10.1016/S0140-6736(14)61393-3
2. Sveinbjornsdottir S. The clinical symptoms of Parkinson's disease. *J Neurochem*. 2016;139:318–24. doi: 10.1111/jnc.13691
3. Xiong Y, Han D, He J, Zong R, Bian X, Duan C, et al. Correlation of visual area with tremor improvement after MRgFUS thalamotomy in Parkinson's disease. *J Neurosurg*. 2022;136:681–8. doi: 10.3171/2021.3.JNS204329
4. Giugni JC, Okun MS. Treatment of advanced Parkinson's disease. *Curr Opin Neurol*. 2014;27:450–60. doi: 10.1097/WCO.0000000000000118
5. Dahmani L, Bai Y, Li M, Ren J, Shen L, Ma J, et al. Focused ultrasound thalamotomy for tremor treatment impacts the cerebello-thalamo-cortical network. *NPJ Parkinsons Dis*. 2023;9:90. doi: 10.1038/s41531-023-00543-8
6. Ko TH, Lee YH, Chan L, Tsai KW, Hong CT, Lo WL. Magnetic resonance-guided focused ultrasound surgery for Parkinson's disease: a mini-review and comparison between deep brain stimulation. *Parkinsonism Relat Disord*. 2023;111:105431. doi: 10.1016/j.parkrel-dis.2023.105431
7. Mansouri A, Taslimi S, Badhiwala JH, Witiw CD, Nasiri F, Odekerken V, et al. Deep brain stimulation for Parkinson's disease: meta-analysis of results of randomized trials at varying lengths of follow-up. *J Neurosurg*. 2018;128:1199–213. doi: 10.3171/2016.11.JNS16715
8. Yeoh TY, Manninen P, Kalia SK, Venkatraghavan L. Anesthesia considerations for patients with an implanted deep brain stimulator undergoing surgery: a review and update. *Can J Anaesth*. 2017;64:308–19. doi: 10.1007/s12630-016-0794-8
9. Zaaroor M, Sinai A, Goldsher D, Eran A, Nassar M, Schlesinger I. Magnetic resonance-guided focused ultrasound thalamotomy for tremor: a report of 30 Parkinson's disease and essential tremor cases. *J Neurosurg*. 2018;128:202–10. doi: 10.3171/2016.10.JNS16758
10. Bond AE, Shah BB, Huss DS, Dallapiazza RF, Warren A, Harrison MB, et al. Safety and efficacy of focused ultrasound Thalamotomy for patients with medication-refractory, tremor-dominant Parkinson disease: a randomized clinical trial. *JAMA Neurol*. 2017;74:1412–8. doi: 10.1001/jamaneurol.2017.3098
11. Schlesinger I, Eran A, Sinai A, Erikh I, Nassar M, Goldsher D, et al. MRI guided focused ultrasound Thalamotomy for moderate-to-severe tremor in Parkinson's disease. *Parkinsons Dis*. 2015;2015:219149. doi: 10.1155/2015/219149
12. Han X, Huang R, Meng T, Yin H, Song D. The roles of magnetic resonance-guided focused ultrasound in pain relief in patients with bone metastases: a systemic review and Meta-analysis. *Front Oncol*. 2021;11:617295. doi: 10.3389/fonc.2021.617295
13. Moro E, Volkmann J, Konig IR, Winkler S, Hiller A, Hasin-Baer S, et al. Bilateral subthalamic stimulation in Parkin and PINK1 parkinsonism. *Neurology*. 2008;70:1186–91. doi: 10.1212/01.wnl.0000307748.11216.03
14. Agrawal M, Garg K, Samala R, Rajan R, Naik V, Singh M. Outcome and complications of MR guided focused ultrasound for essential tremor: a systematic review and Meta-analysis. *Front Neurol*. 2021;12:654711. doi: 10.3389/fneur.2021.654711
15. Elias WJ, Lipsman N, Ondo WG, Ghanouni P, Kim YG, Lee W, et al. A randomized trial of focused ultrasound Thalamotomy for essential tremor. *N Engl J Med*. 2016;375:730–9. doi: 10.1056/NEJMoa1600159
16. Xu Y, He Q, Wang M, Gao Y, Liu X, Li D, et al. Safety and efficacy of magnetic resonance imaging-guided focused ultrasound neurosurgery for Parkinson's disease: a systematic review. *Neurosurg Rev*. 2021;44:115–27. doi: 10.1007/s10143-019-01216-y
17. Lennon JC, Hassan I. Magnetic resonance-guided focused ultrasound for Parkinson's disease since ExAblate, 2016-2019: a systematic review. *Neurol Sci*. 2021;42:553–63. doi: 10.1007/s10072-020-05020-1
18. Ge Y, Wang Z, Gu F, Yang X, Chen Z, Dong W, et al. Clinical application of magnetic resonance-guided focused ultrasound in Parkinson's disease: a meta-analysis of randomized clinical trials. *Neurol Sci*. 2021;42:3595–604. doi: 10.1007/s10072-021-05443-4
19. Chen J, Lu M, Chen CM, Tsai C. Stepwise dual-target magnetic resonance-guided focused ultrasound in tremor-dominant Parkinson disease: a feasibility study. *World Neurosurg*. 2023;171:E464–70.
20. Wang X, Wang S, Lin J, Zhang D, Lu H, Xiong Y, et al. Gray matter alterations in tremor-dominant Parkinson's disease after MRgFUS thalamotomy are correlated with tremor improvement: a pilot study. *Quant Imaging Med Surg*. 2023;13:4415–28.
21. Saporito G, Sucapane P, Ornello R, Cerone D, Bruno F, Splendiani A, et al. Cognitive outcomes after focused ultrasound thalamotomy for tremor: results from the COGNIFUS (COGNitive in focused UltraSound) study. *Parkinsonism Relat Disord*. 2023;106:105230.
22. Yin C, Zong R, Song G, Zhou J, Pan L, Li X. Comparison of motor scores between OFF and ON states in tremor-dominant Parkinson's disease after MRgFUS treatment. *J Clin Med*. 2022;11:502.

23. Golfrè AN, Cilia R, Romito LM, Bonvegna S, Straccia G, Elia AE, et al. Magnetic resonance-guided focused ultrasound Thalamotomy may spare dopaminergic therapy in early-stage tremor-dominant Parkinson's disease: a pilot study. *Mov Disord.* 2022;37:2289–95.
24. Stanziano M, Golfrè Andreasi N, Messina G, Rinaldo S, Palermo S, Verri M, et al. Resting state functional connectivity signatures of MRgFUS vim Thalamotomy in Parkinson's disease: a preliminary study. *Front Neurol.* 2021;12:734.
25. Iacopino DG, Gagliardo C, Giugno A, Giammalva GR, Napoli A, Maugeri R, et al. Preliminary experience with a transcranial magnetic resonance-guided focused ultrasound surgery system integrated with a 1.5-T MRI unit in a series of patients with essential tremor and Parkinson's disease. *Neurosurg Focus.* 2018;45:E10.
26. Fasano A, Llinas M, Munhoz RP, Hlasny E, Kucharczyk W, Lozano AM. MRI-guided focused ultrasound thalamotomy in non-ET Tremor Syndromes. *Neurology.* 2017;89:771–5.
27. Ranjan M, Elias GJB, Boutet A, Zhong J, Chu P, Germann J, et al. Tractography-based targeting of the ventral intermediate nucleus: accuracy and clinical utility in MRgFUS thalamotomy. *J Neurosurg.* 2020;133:1002–9.
28. Kyle K, Peters J, Jonker B, Barnett Y, Maamary J, Barnett M, et al. Magnetic Resonance–Guided Focused Ultrasound for Treatment of Essential Tremor: Ventral Intermediate Nucleus Ablation Alone or Additional Posterior Subthalamic Area Lesioning? *Mov Disord Clin Pract.* 2024;11:504–514.
29. Bruno F, Catalucci A, Varrassi M, Arrigoni F, Sucapane P, Cerone D, et al. Comparative evaluation of tractography-based direct targeting and atlas-based indirect targeting of the ventral intermediate (Vim) nucleus in MRgFUS thalamotomy. *Sci Rep.* 2021;11:13538.
30. Zhang JR, Feng T, Hou YN, Chan P, Wu T. Functional Connectivity of Vim Nucleus in Tremor- and Akinetic-/Rigid-Dominant Parkinson's Disease. *CNS Neurosci Ther.* 2016;22:378–86. doi:10.1111/cns.12512
31. Harary M, Segar DJ, Hayes MT, Cosgrove GR. Unilateral Thalamic Deep Brain Stimulation Versus Focused Ultrasound Thalamotomy for Essential Tremor. *World Neurosurg.* 2019;126:e144–e152. doi: 10.1016/j.wneu.2019.01.281