

ORIGINAL

Mapa cortical y subcortical del lenguaje. Correlación de la resonancia magnética funcional y tractografía en 3 T con la estimulación intraoperatoria cortical y subcortical en tumores cerebrales localizados en áreas elocuentes

M. Jiménez de la Peña^{a,*}, S. Gil Robles^b, M. Recio Rodríguez^a, C. Ruiz Ocaña^b y V. Martínez de Vega^a

^a Departamento de Diagnóstico por la Imagen, Hospital Universitario Quirón, Madrid, España

^b Departamento de Neurocirugía, Hospital Universitario Quirón, Madrid, España

Recibido el 22 de marzo de 2011; aceptado el 20 de enero de 2012

Disponible en Internet el 21 de abril de 2012

PALABRAS CLAVE

Resonancia magnética funcional;
Resonancia magnética funcional del lenguaje;
Tractografía;
Mapeo eléctrico cortical;
Mapeo eléctrico subcortical;
Tumores

Resumen

Objetivo: Describir, con estudios funcionales de activación y tractografía en una RM de 3 Teslas (3 T), las áreas corticales y vías subcorticales implicadas en el lenguaje, y mostrar la buena correlación de estos estudios funcionales con la estimulación directa cortical y subcortical intraoperatoria.

Material y métodos: Presentamos una serie de 14 pacientes con lesiones focales cerebrales junto a áreas elocuentes. Todos los pacientes se evaluaron neuropsicológicamente antes y después de la cirugía, se estudiaron con RM con secuencias estructurales, de perfusión, espectroscopia, resonancia magnética funcional y del lenguaje y tractografía 3D, y se sometieron a un mapeo cortical de estimulación cortical y subcortical y resección de la lesión. Se hizo un control posquirúrgico a las 24 h.

Resultados: La correlación funcional motora y del haz corticoespinal con el mapeo intraoperatorio cortical y subcortical motor fue completa. Las áreas elocuentes del lenguaje expresivo y del lenguaje receptivo presentaron una alta correlación con el mapeo cortical intraoperatorio en todos los casos menos 2, un glioma infiltrativo de alto grado y un glioma de bajo grado frontal. La tractografía 3D identificó los fascículos arcuato, frontoparietal, subcalloso, frontooccipital inferior y las radiaciones ópticas, lo que permitió marcar los límites de la resección. La correlación con el mapeo subcortical en la disposición anatómica de los fascículos con respecto a las lesiones, fue completa.

Conclusión: La máxima resección tumoral sin déficits asociados es el mejor tratamiento posible ante un tumor cerebral, lo que resalta la necesidad de estudios funcionales de alta calidad en la planificación prequirúrgica.

© 2011 SERAM. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: cataldo@telefonica.net (M. Jiménez de la Peña).

KEYWORDS

Functional magnetic resonance imaging; Functional magnetic resonance imaging of language; Tractography; Electrical cortical mapping; Electrical subcortical mapping; Tumors

Cortical and subcortical mapping of language areas: correlation of functional MRI and tractography in a 3 T scanner with intraoperative cortical and subcortical stimulation in patients with brain tumors located in eloquent areas

Abstract

Objective: To describe the detection of cortical areas and subcortical pathways involved in language observed in MRI activation studies and tractography in a 3 T MRI scanner and to correlate the findings of these functional studies with direct intraoperative cortical and subcortical stimulation.

Material and methods: We present a series of 14 patients with focal brain tumors adjacent to eloquent brain areas. All patients underwent neuropsychological evaluation before and after surgery. All patients underwent MRI examination including structural sequences, perfusion imaging, spectroscopy, functional imaging to determine activation of motor and language areas, and 3D tractography. All patients underwent cortical mapping through cortical and subcortical stimulation during the operation to resect the tumor. Postoperative follow-up studies were done 24 hours after surgery.

Results: The correlation of motor function and of the corticospinal tract determined by functional MRI and tractography with intraoperative mapping of cortical and subcortical motor areas was complete. The eloquent brain areas of language expression and reception were strongly correlated with intraoperative cortical mapping in all but two cases (a high grade infiltrating glioma and a low grade glioma located in the frontal lobe). 3D tractography identified the arcuate fasciculus, the lateral part of the superior longitudinal fasciculus, the subcallosal fasciculus, the inferior fronto-occipital fasciculus, and the optic radiations, which made it possible to mark the limits of the resection. The correlation with the subcortical mapping of the anatomic arrangement of the fasciculi with respect to the lesions was complete.

Conclusion: The best treatment for brain tumors is maximum resection without associated deficits, so high quality functional studies are necessary for preoperative planning.

© 2011 SERAM. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Introducción

La principal indicación clínica de los estudios funcionales de activación y de tractografía es la planificación prequirúrgica de las lesiones focales cerebrales en áreas elocuentes. Los paradigmas motores de la resonancia magnética funcional (RMf) son simples y consistentes, fácilmente reproducibles, por lo que se han validado y correlacionado ampliamente en la bibliografía médica con las técnicas de mapeo cortical y subcortical^{1,2}. Sin embargo, el lenguaje es una tarea cognitiva compleja y los paradigmas experimentales utilizados presentan una mayor complejidad y variabilidad entre los individuos, con lo que su aplicación rutinaria no es fácil. Los mapeos quirúrgicos intraoperatorios han evidenciado que no solamente son básicas las clásicas áreas de lenguaje de Broca y de Wernicke³⁻⁶, sino que existe una red mucho más compleja que implica mayores áreas de activación cortical^{7,8} y amplias áreas subcorticales⁹⁻¹².

El interés de nuestro artículo es la confirmación de que las nuevas secuencias de activación funcional e imagen de tensor de difusión (ITD) en RM de 3T proporcionan, de forma no invasiva, un mapa prequirúrgico fiable cortical y subcortical¹³⁻¹⁶, al comparar nuestros datos con el mapeo intraoperatorio. Estas técnicas son imprescindibles para una adecuada planificación quirúrgica, especialmente en los centros donde no se realiza mapeo intraoperatorio. Hasta donde sabemos, esta es una de las series más extensas de correlación de pruebas de imagen con un mapeo cortical y subcortical.

Material y métodos

Pacientes

Seleccionamos los pacientes en los que, tanto los estudios funcionales como el mapeo intraoperatorio, fueron satisfactorios (adecuada colaboración del paciente en la realización de los paradigmas, ausencia de alteraciones por movimiento excesivo, ausencia de crisis consecutivas en la estimulación intraoperatoria), y, por ello, nuestra serie se reduce a 14 pacientes con lesiones expansivas tumorales intracerebrales en los que se realizó un estudio prequirúrgico con neuroimagen funcional y, como estándar de referencia, una estimulación eléctrica cortical y subcortical intraoperatoria. Todos los pacientes firmaron su consentimiento informado para pruebas diagnósticas. Por ser un estudio retrospectivo no se solicitó el permiso del comité de ética hospitalario.

Estudio funcional de activación

Paradigmas funcionales

Se realizó un estudio funcional motor con movimientos alternantes de oposición de los dedos al pulgar (*finger-tapping*), previo al estudio funcional del lenguaje, porque rutinariamente se inicia el abordaje intraoperatorio mapeando el córtex sensitivomotor, identificando el surco central y confirmando la respuesta del paciente.

De los múltiples paradigmas descritos aplicables al estudio del lenguaje^{17,18}, en nuestro centro utilizamos

3 paradigmas para el estudio funcional del lenguaje: 1) paradigma de «generación verbal» (relacionar acciones con los nombres de objetos presentados visualmente. El paciente debe intentar verbalizar sin mover la cara en los períodos de activación. En los períodos de reposo, para realizar una tarea automática, los pacientes cuentan en sentido ascendente); 2) paradigma de «escucha pasiva» (escuchar y entender un texto; al paciente se le informa que posteriormente se le harán preguntas de comprensión. En los períodos de reposo el paciente escucha un texto invertido no comprensible); y 3) paradigma de «lectura de un texto» (lectura de un texto presentado. En los períodos de reposo se le presenta visualmente un texto ilegible). Con el primer paradigma se pretenden activar las áreas expresivas o motoras del lenguaje. Las otras 2 tareas buscan la activación de las áreas receptoras y de lectura del lenguaje.

Obtención de los datos

La adquisición fue realizada en un equipo de 3T (GE Medical Systems, Milwaukee, WI, USA) utilizando una secuencia gradiente eco-planar (TE: 35 ms; TR: 3000 ms; ángulo 90°; matriz: 64 × 64; 1 adquisición; FOV: 24 cm; grosor de corte: 4,0 mm; espaciado: 0,0). La imagen anatómica de referencia es un 3D-SPGR-T1 en plano axial. Se utilizó un diseño en bloques alternando períodos de actividad y de reposo, comenzando con actividad. Se hicieron 6 ciclos de actividad-reposo, con 10 fases de reposo y 10 de actividad con una duración de 30 segundos por período, obteniéndose 120 volúmenes.

Posproceso

El posprocesado de las imágenes funcionales se realizó con el programa de 3D Brainwave (General Electric Health Care, Milwaukee, WI, USA). Las imágenes anatómicas 3D-SPGR T1 se segmentaron automáticamente eliminando las partes blandas. Los volúmenes de imagen funcional obtenidos se alinearon con el método Air de Woods, et al.¹⁷ (translación máxima 0,22 mm/máxima rotación de 0,07°). Posteriormente se procesaron con un filtro espacial de Gauss (*full width at half maximum [FWHM]* = 8,8 mm). Los datos funcionales se analizaron según un modelo de regresión lineal generando un mapa *t-test*, que se convierte en un mapa Z de activación. El umbral estadístico utilizado es el de Z = 4,51451 con un valor de p = 0,05, representándose únicamente las zonas de activación que superan ese umbral. Las zonas activadas se presentaron en un mapa paramétrico fusionado con las imágenes anatómicas y representadas en un volumen 3D.

Estudios 3D-ITD

Se utilizó una secuencia de difusión espín-eco eco-planar con 25-45 direcciones en planos axial, sagital y coronal (TE: mínimo; TR: 6000 ms; matriz: 128 × 128; 1 adquisición; FOV: 24 cm; grosor: 4 mm; espaciado: 1,5 mm; valor máximo de b: 1000). La reconstrucción 3D utiliza un programa de FuncTool 3D Fiber Tracking (General Electric Health Care, Milwaukee, WI, USA). Los haces de sustancia blanca, obtenidos por tractografía con el método de semilla¹⁷, fueron: el fascículo frontooccipital inferior, fascículo arcuato, fascículo

subcalloso, haz frontooccipital y fascículo longitudinal inferior. Se añadieron rutinariamente el haz corticoespinal y las radiaciones ópticas.

Estimulación eléctrica cortical y subcortical intraoperatoria

En todos los pacientes se había procedido a la localización del tumor con ecografía intraoperatoria, bajo anestesia local, delimitando los bordes y marcándolos con las letras A, B, C y D. El mapeo con estimulación eléctrica cortical comenzó en el córtex sensitivomotor, alrededor del surco de Rolando. Posteriormente, se procedió al mapeo del lenguaje, con diferentes paradigmas (verbalización, nominación de objetos, lectura de un texto). La intensidad de la estimulación eléctrica osciló entre 1-2 mA, hasta un máximo de 8 mA, que induce crisis. La estimulación se consideró positiva si se producía una alteración en el discurso verbal tras 3 estimulaciones seguidas en un área de 0,5 × 0,5 cm. Esta se marcaba con etiquetas blancas numeradas. En un segundo tiempo se procedió a la resección de la lesión, llegando a la región subcortical. La estimulación eléctrica de estos haces subcorticales ocasionó alteraciones del lenguaje similares a las áreas corticales. En este momento se siguieron los haces funcionales subcorticales ya mapeados desde su origen cortical y se continuó con la resección hasta que los haces subcorticales elocuentes rodeaban la cavidad quirúrgica.

Se consideraron como marcas anatómicas de referencia en el mapeo del lenguaje, el opérculo rolándico (que delimita el córtex facial motor), las ramas anterior y ascendente de la cisura de Silvio (que delimitan el área de Broca y el córtex premotor ventral), y, finalmente, el ramo horizontal silviano junto con el tercio posterior del surco temporal superior (que marcan el área de Wernicke).

Correlación imagen-mapeo intraoperatorio

La correlación cortical se consideró positiva cuando existía concordancia anatómica con las circunvoluciones activadas en el estudio 3D de la RMf con un margen de error menor a 0,5 cm. Se utilizaron las marcas anatómicas de referencia en el mapeo del lenguaje, descritas previamente, para identificar las áreas de activación funcional. La correlación subcortical se consideró positiva cuando la disposición espacial de los haces subcorticales (craneal, caudal, medial, lateral, anterior o posterior) se correspondía con la del mapeo subcortical.

Control posquirúrgico

Se realizó un estudio de RM de control a las 24 horas, y un control radiológico y neuropsicológico a los 3 meses.

Resultados

Las características clínicas de los estudios funcionales, los fascículos subcorticales, y de los resultados quirúrgicos de los casos correlacionados se muestran en la **tabla 1**. Se encontró una correlación cortical positiva en 12 de los

Tabla 1 Pacientes correlacionados: hallazgos clínico-radiológicos

Lesión	Síntomas	Áreas funcionales	Fascículos subcorticales	Resección
Oligoastrocitoma insular izquierdo	Parestesias	Área de Broca Cíortex premotor, facial motor	FFOI	Parcial
Glioblastoma temporal posterior	Síndrome de Gerstman	Área de Wernicke	FA, RO	Completa
Xantoastrocitoma plemórfico frontal izquierdo	Inicio discurso	Área motora suplementaria	FS, CE	Completa
Oligodendrogioma insular izquierdo	Crisis parcial, parafasias	Área de Broca, Cíortex premotor, facial motor	FFOI	Subtotal
Glioma grado II polo temporal izquierdo	Hipoacusia, nistagmus	Área de Broca	FU	Completa
Displasia occipitotemporal izquierda	Crisis parcial	Área de Wernicke	FFOI	Completa
Glioma grado II frontal derecho	Asintomática	Área motora mano y cara	FLI	
Cavernoma occipital derecho	Hemianopsia homónima	Área visual primaria	CE	Completa
Metástasis frontal izquierda	Crisis	Área de Broca, Cíortex premotor, facial motor	RO	Completa
			FFOI	Completa
Quiste neuroepitelial frontal	Asintomática	Área primaria somatosensorial	FU	
Glioma grado III cíngulo y frontal derecho	Crisis parcial	Área premotora, motora primera, motora izquierda	CE	Completa
		Área de Broca	FP	
Glioma grado III temporal izquierdo	Crisis parcial	Área de Wernicke	CE	Parcial
Metástasis polo temporal izquierdo	Crisis parcial	Área de Broca y Wernicke	FFOI	
			FA, RO	Parcial
Cavernoma corona radiada izquierda	Parestesias	C. premotor	FFOI	Completa
		Área motora mano, brazo y cara	CE	
			CE	Parcial

CE: haz córtico-espinal; FA: fascículo arcuato; FFI: fascículo frontooccipital inferior; FLI: fascículo longitudinal inferior; FP: haz frontoparietal; FS: fascículo subcalloso; FU: fascículo uncinado; RO: radiaciones ópticas.

14 pacientes estudiados, y sin coincidencia completa en 2 pacientes (glioma grado II frontal y glioma grado III del cíngulo). En el primero, por un falso positivo en el estudio funcional ocasionado por la vena precentral, y en el segundo, por la extensa infiltración tumoral que inhibía la activación funcional. En este último caso, además, el mapeo intraoperatorio fue parcial, al presentar el paciente crisis durante el procedimiento.

La evaluación neuropsicológica postoperatoria de los pacientes fue óptima, y no se apreciaron déficits del lenguaje añadidos a los preoperatorios en ninguno de los 14 pacientes.

Las áreas corticales implicadas en el lenguaje (fig. 1) correlacionadas con la estimulación cortical (tabla 2) fueron:

1. *Frontales*: circunvolución frontal inferior (área de Broca), pars triangular y opercular; cíortex facial motor (margen más inferior de la circunvolución frontal ascendente); cíortex premotor (anterior al cíortex facial

Tabla 2 Estimulación eléctrica cortical

Área	Alteración del lenguaje
Circunvolución frontal inferior (Broca)	Anomia
Cíortex premotor	Anartria
Cíortex facial motor	Imposibilidad de articular palabras
Área motora suplementaria	Trastorno del inicio del discurso
Cíortex temporal posterior	Anomia
Circunvolución parietal inferior	Anomia
Circunvolución temporal inferior, giro fusiforme*	Alteración de la lectura e identificación de la forma de la palabra

*Visual word form area.

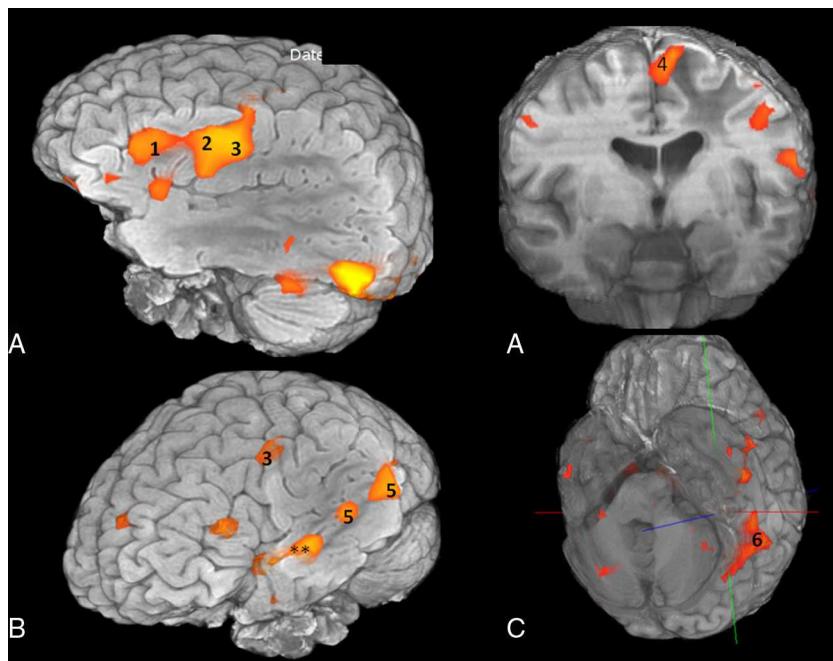


Figura 1 RM funcional volumétrica. A) Áreas corticales frontales, B) temporoparietales y C) occipitotemporal basal implicadas en el lenguaje. 1: Área de Broca; 2: Cíortex premotor; 3: Cíortex facial motor; 4: Área motora suplementaria; 5: Área de Wernicke; 6: Área visual de la forma de la palabra «*Visual word form area*». **Áreas de asociación auditiva.

motor); área motora suplementaria (medial a la parte más craneal del surco precentral).

2. *Temporoparietales*: cíortex temporal posterior izquierdo: tercio posterior de las circunvoluciones temporales superior y media; lóbulo parietal inferior izquierdo: circunvoluciones angular y supramarginal.
3. *Occipitotemporal basal*: circunvoluciones temporal inferior y fusiforme. Son áreas relacionadas con el reconocimiento visual, especializadas en la identificación de la forma de las palabras o de los objetos, como el giro fusiforme izquierdo («*visual word form area*» y «*visual object-form area*»).

En el caso de los fascículos subcorticales «funcionales» la concordancia fue del 100%. Los haces correlacionados fueron (tabla 3) (fig. 2):

1. *Fascículo arcuato*: parte medial del fascículo longitudinal superior, conectando el cíortex lateral frontal y parietotemporal.

2. *Fascículo o haz frontoparietal*: parte lateral del fascículo longitudinal superior, conectando el área de Broca con el lóbulo parietal inferior.
3. *Fascículo frontooccipital inferior*: conecta áreas prefrontales y occipito-temporoparietales mediales. En su tercio anterior se sitúa craneal al techo del asta temporal y a las radiaciones ópticas. En su segmento temporooccipital posterior es lateral al asta occipital ventricular, entrando a formar parte del *stratum sagital*. Termina en el cíortex medial temporoccipital.
4. *Fascículo longitudinal inferior*: en su trayecto temporooccipital izquierdo interviene en la identificación de la forma de los objetos o «*visual object-form area*».
5. *Fascículo subcalloso*: rodea el cuerno frontal ventricular y conecta el área motora suplementaria con el cíngulo y el núcleo caudado.

Otro haz identificado fue el fascículo uncinado (fig. 2) que conecta el cíortex frontotemporal anterior, no implicado aparentemente en el lenguaje. Sirve como punto de referencia en la localización del fascículo frontooccipital inferior y es punto de partida del asa de Meyer y de las radiaciones ópticas (fig. 3) (trayecto temporooccipital posterior formando parte del *stratum sagital*, en situación lateral al asta occipital, con curvadura medial hacia la cisura calcarina).

Las figuras 4, 5 y 6 muestran un caso representativo de correlación. Más casos pueden encontrarse en las figuras de la 7 a la 14 solo disponibles en la versión *on-line*.

Tabla 3 Estimulación eléctrica subcortical

Fascículo	Alteración del lenguaje
Frontooccipital inferior	Parafasia semántica
Longitudinal inferior	Dificultad para leer
Arcuato	Parafasia fonémica
Frontoparietal	Apraxia
Subcalloso	Afasia cortical transitoria
Radiaciones ópticas	Fosfenos

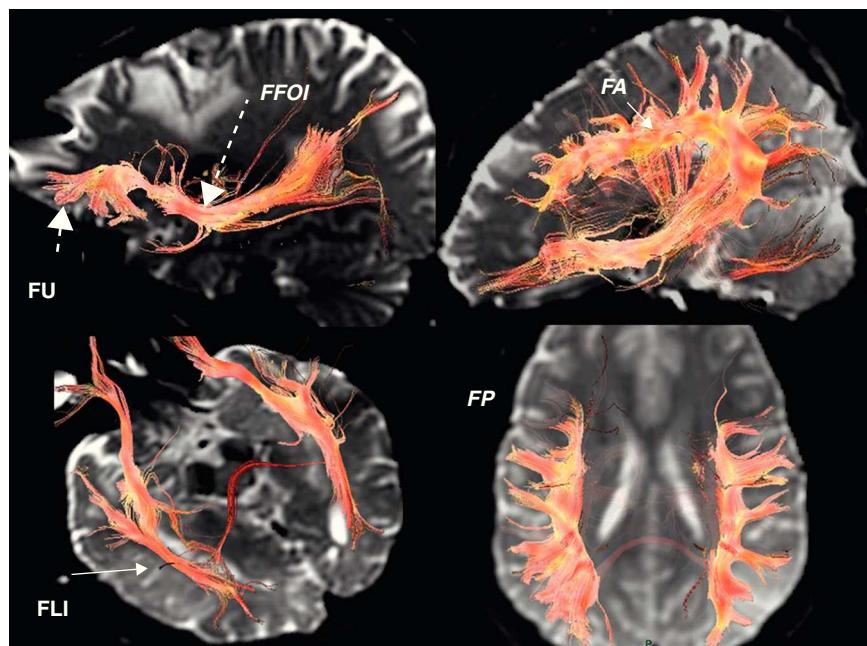


Figura 2 Tractografía 3D. Fascículos subcorticales funcionales implicados en el lenguaje. FA: fascículo arcuato (flecha corta continua); FFI: fascículo frontooccipital inferior (flecha larga discontinua); FLI: fascículo longitudinal inferior (flecha larga continua); FP: haz frontoparietal; FU: fascículo uncinado (flecha corta discontinua).

Discusión

El tratamiento quirúrgico es la elección en los tumores cerebrales. Aunque los tumores gliales de bajo grado con volúmenes inferiores a 10cc raramente sufren transformación a alto grado, su tratamiento con terapias adyuvantes como la quimioterapia o la radioterapia es más efectivo. La optimización de los estudios funcionales y de ITD permite una adecuada resolución de las áreas corticales y de los finos haces subcorticales^{15,18}, así como valoración «fiable» de la actividad neuronal.

El interés de nuestro artículo, que muestra una de las series más extensas de correlación de pruebas de imagen con mapeo cortical y subcortical, es la confirmación de que la RMf y la ITD le ofrecen al neurocirujano un mapa cortical y subcortical preoperatorio fiable y real.

Los paradigmas utilizados en nuestro centro son similares a los empleados en la bibliografía, principalmente de fluencia verbal, de lectura y de escucha pasiva^{19,20}, reproducibles en todos los pacientes.

La limitación de los estudios funcionales es aún la incapacidad de cuantificar de forma exacta el área de activación,

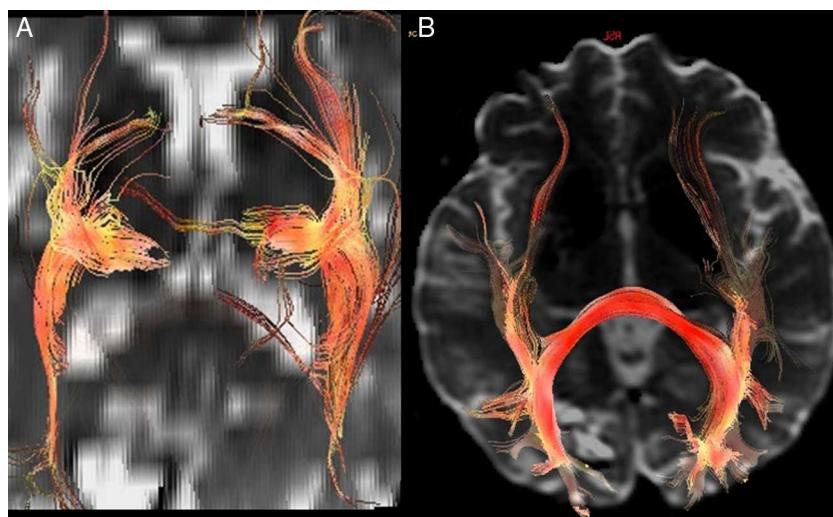


Figura 3 Radiaciones ópticas y asa de Meyer. La tractografía 3D para la identificación del A) asa de Meyer y B) de las radiaciones ópticas mejora con imagen de tensor de difusión con 45 direcciones.

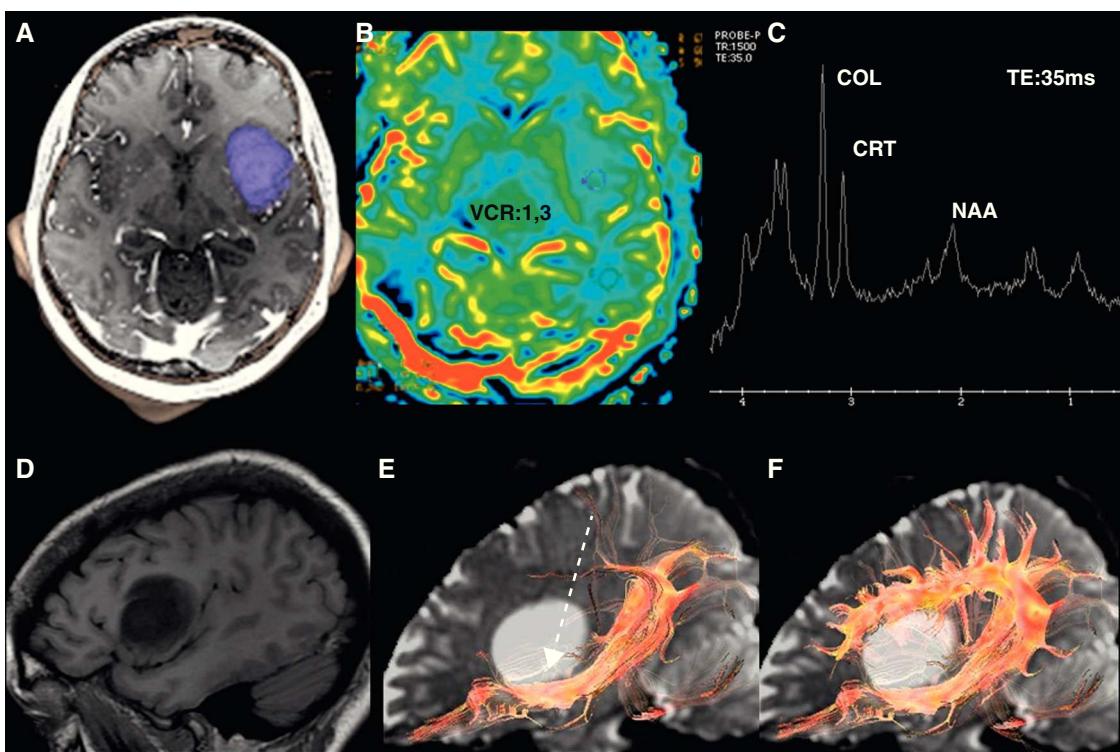


Figura 4 Oligodendrogloma de bajo grado en la región insular izquierda. Paciente de 25 años con antecedente de accidente de tráfico y parestesias en el miembro superior derecho. A) Lesión insular izquierda con un volumen tumoral de 25 cc. B) En el mapa de perfusión tiene un volumen sanguíneo cerebral relativo (VCR) de 1,3. C) En el estudio de espectroscopia-RM presenta incremento de colina y mioinositol, y una discreta reducción de N-acetil-aspartato. Estos son datos sugestivos de un glioma de bajo grado. D) El plano sagital T1 muestra la relación de la lesión con el opérculo frontal. E) La tractografía 3D demuestra una infiltración del tercio anterior del fascículo frontooccipital inferior (flecha discontinua). F) El fascículo arcuato está íntegro.

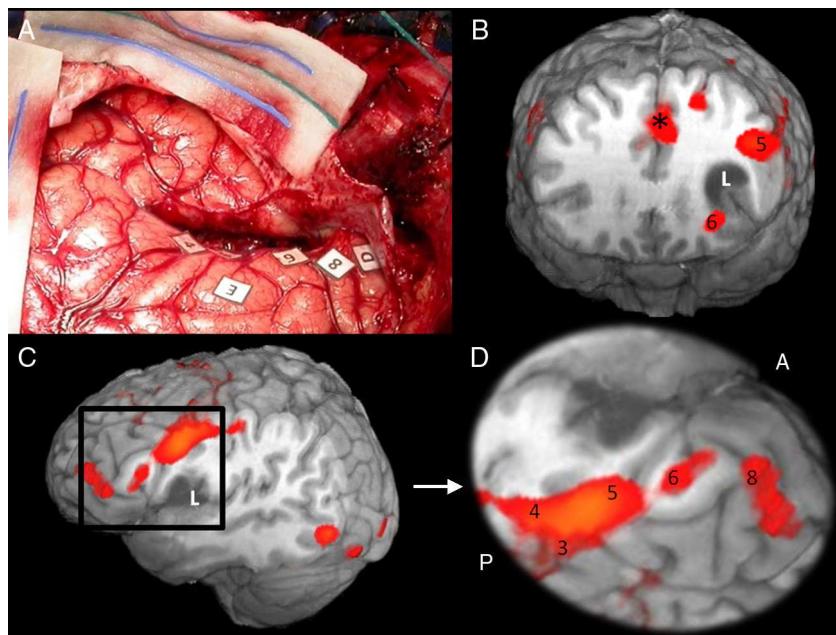


Figura 5 Correlación cortical entre la RM funcional y el mapeo eléctrico quirúrgico en el mismo paciente de la [figura 4](#). A) Mapeo intraoperatorio. Paciente en decúbito lateral derecho. 4: Córtez facial motor; 3: córtex premotor; 5, 6: área de Broca; 8: eye field frontales. Correlación con la RM funcional (B, C y D): áreas de activación coincidentes con el mapeo cortical. *Área motora suplementaria. A: anterior; P: posterior.

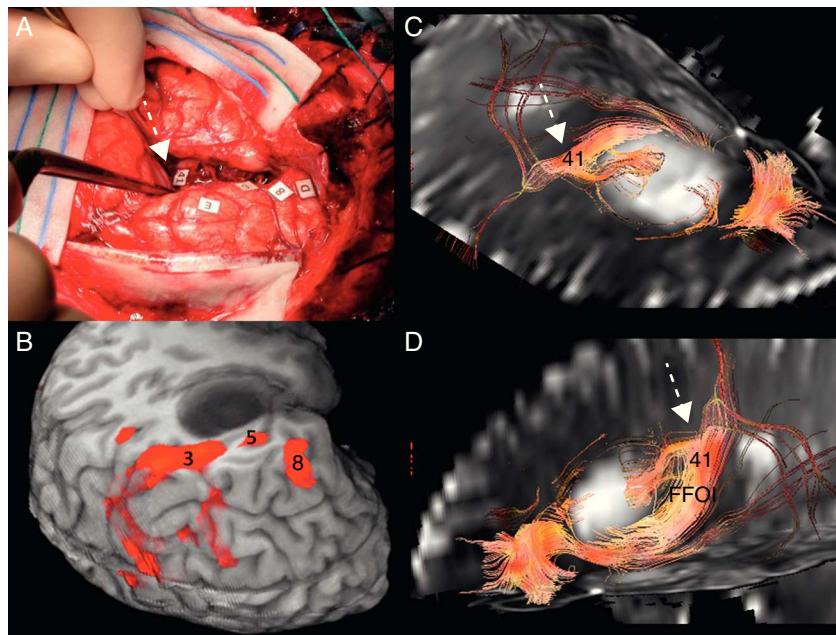


Figura 6 Correlación subcortical entre la imagen de tensor de difusión (ITD) y el mapeo eléctrico quirúrgico en el mismo paciente de las figuras 4 y 5. A) Mapeo subcortical intraoperatorio. Paciente en decúbito lateral derecho. 41: Fascículo frontooccipital inferior (FFOI). B) Correlación cortical con la RM funcional: 3: córtex premotor; 5: área de Broca; 8: *eye field* frontales. Reconstrucciones sagitales 3D-ITD del FFOI. C y D) El margen posterior del FFOI (41) (flecha) limita la resección posterior del tumor.

aunque probablemente este hecho sea cuestión de tiempo. Hay que recordar, que esta cuantificación tampoco es posible en el mapeo cortical ni subcortical. Quizá la mejor validación de estos estudios es la evaluación neuropsicológica pre y posquirúrgica de los pacientes sin que se perciban cambios tras la cirugía, como ocurrió en nuestros pacientes.

En conclusión, la RMf y las secuencias ITD permiten una adecuada planificación quirúrgica de las lesiones cerebrales cercanas a las áreas elocuentes. La gran correlación de estas técnicas con el mapeo quirúrgico córtico-subcortical es indicativa del gran avance de estas técnicas de imagen.

Autoría

1. Responsable de la integridad del estudio: MJP, SGR y MRR.
2. Concepción del estudio: MJP y SGR.
3. Diseño del estudio: MJP, SGR, MRR, VMV y CRO.
4. Obtención de los datos: MJP, SGR y MRR.
5. Análisis e interpretación de los datos: MJP y SGR.
6. Tratamiento estadístico: No procede.
7. Búsqueda bibliográfica: MRR.
8. Redacción del trabajo: MJP.
9. Revisión crítica del manuscrito con aportaciones intelectualmente relevantes: MJP, SGR, MRR, VMV y CRO.
10. Aprobación de la versión final: MJP, SGR, MRR, VMV y CRO.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Al equipo de Técnicos de Resonancia del Departamento de Diagnóstico por la Imagen.

Roberto García (GE España).

Anexo. Material adicional

Puede consultarse material adicional a este artículo en su versión electrónica, disponible en [doi:10.1016/j.rx.2012.01.004](https://doi.org/10.1016/j.rx.2012.01.004).

Bibliografía

1. Pillai JJ. The evolution of clinical functional imaging during the past 2 decades and its current impact on neurosurgical planning. AJNR Am J Neuroradiol. 2010;31:219-25.
2. Chakraborty A, McEvoy AW. Presurgical functional mapping with functional MRI. Curr Opin Neurol. 2008;21:446-51.
3. Binder JR, Rao SM, Hammeke TA, Frost JA, Bandettini PA, Jesmanowicz A, et al. Lateralized human brain language systems demonstrated by task subtraction functional magnetic resonance imaging. Arch Neurol. 1995;52:593-601.
4. Rutten GJ, Ramsey NF, Van Rijen PC, Noordmans HJ, Van Veelen CW. Development of a functional magnetic resonance imaging protocol for intraoperative localization of critical temporoparietal language areas. Ann Neurol. 2002;51:350-60.
5. Abou-Khalil B. An update on determination of language dominance in screening for epilepsy surgery: the Wada test and newer noninvasive alternatives. Epilepsia. 2007;48:442-55.
6. Roux FE, Boulanger K, Lotterie JA, Mejdoubi M, LeSage JP, Berry I. Language functional magnetic resonance imaging in preoperative assessment of language areas: correlation with direct cortical stimulation. Neurosurgery. 2003;52:1335-47, discussion 1345-13477.

7. Duffau H, Capelle L, Denvil D, Gatignol P, Sicchez N, Lopes M, et al. The role of the dominant premotor cortex in language: a study using intraoperative functional mapping in awake patients. *Neuroimage*. 2003;20:1903–14.
8. Bello L, Gallucci M, Fava M, Carrabba G, Giussani C, Acerbi F, et al. Intraoperative subcortical language tract mapping guides surgical removal of gliomas involving speech areas. *Neurosurgery*. 2007;60:67–80, discussion 80-82.
9. Duffau H, Capelle L, Sicchez N, Denvil D, Lopes M, Sicchez JP, et al. Intraoperative mapping of the subcortical language pathways using direct stimulations. An anatomo-functional study. *Brain*. 2002;125:199–214.
10. Duffau H, Gatignol P, Denvil D, Lopes M, Capelle L. The articulatory loop: study of the subcortical connectivity by electrostimulation. *Neuroreport*. 2003;14:2005–8.
11. Gil Robles S, Gatignol P, Capelle L, Mitchell MC, Duffau H. The role of dominant striatum in language: a study using intraoperative electrical stimulation. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2005;76:940–6.
12. Bello L, Gambini A, Castellano A, Carrabba G, Acerbi F, Fava E, et al. Motor and language DTI Fiber Tracking combined with intraoperative subcortical mapping for surgical removal of gliomas. *Neuroimage*. 2008;39:369–82.
13. Okada T, Mikuni N, Miki Y, Kikuta K, Urayama S, Hanakawa T, et al. Corticospinal tract localization: integration of diffusion-tensor tractography at 3-T MR imaging with intraoperative white matter stimulation mapping -preliminary results. *Radiology*. 2006;240:849–57.
14. Sunaert S. Presurgical planning for tumor resectioning. *J Magn Reson Imaging*. 2006;23:887–905.
15. Schonber T, Pianka P, Hendler T, Pasternak O, Assaf Y. Characterization of displaced white matter by brain tumors using combined DTI and fMRI. *Neuroimage*. 2006;30: 1100–11.
16. Smits M, Visch-Brink E, Schraa-Tam CK, Koudstaal PJ, Van der Lugt A. Functional MR imaging of language processing: an overview of easy-to-implement paradigms for patient care and clinical research. *Radiographics*. 2006;26 Suppl 1: S145–58.
17. Woods RP, Grafton ST, Watson JD, Sicotte NL, Mazziota JC. Automated image registration: II. Intersubject validation of linear and nonlinear models. *J Comput Assist Tomogr*. 1998;22: 153–65.
18. Berman JI, Berger MS, Chung SW, Nagarajan SS, Henry RG. Accuracy of diffusion tensor magnetic resonance imaging tractography assessed using intraoperative subcortical stimulation mapping and magnetic source imaging. *J Neurosurg*. 2007;107:488–94.
19. Lazar M, Alexander AL, Thottakara PJ, Badie B, Field AS. White matter reorganization after surgical resection of brain tumors and vascular malformations. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2006;27:1258–71.
20. Robles SG, Gatignol P, Lehéricy S, Duffau H. Long-term brain plasticity allowing a multistage surgical approach to World Health Organization Grade II gliomas in eloquent areas. *J Neurosurg*. 2008;109:615–24.