

# IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO PARA LA VISUALIZACIÓN DE ELECTRODOS SUBDURALES EN CIRUGÍA DE EPILEPSIA

## IMPLEMENTATION OF A METHOD TO VISUALIZE SUBDURAL ELECTRODES IN EPILEPSY SURGERY

José Luis Ascencio<sup>1</sup>

John Fredy Ochoa<sup>2</sup>

### PALABRAS CLAVE (DeCS)

Electrodos implantados  
Epilepsia  
Imagen por resonancia magnética  
Tomografía computarizada por rayos X

### KEY WORDS (MeSH)

Implanted electrodes  
Epilepsy  
Magnetic resonance imaging  
Tomography, X-Ray

### RESUMEN

**Introducción:** Los electrodos subdurales son muy importantes en el estudio de un alto porcentaje de pacientes evaluados para cirugía de epilepsia. La actividad eléctrica fuera del rango de la electroencefalografía de superficie puede ser capturada a nivel subdural. Los procedimientos de lectura y estimulación para localizar la zona epileptógena usando electrodos subdurales están bien establecidos y las complicaciones son bajas, aunque tienden a aumentar con el tiempo de permanencia del paciente con los electrodos. **Objetivo:** Proponer un método para la visualización de electrodos subdurales que permita agilizar la toma de decisiones. **Materiales y métodos:** Imágenes volumétricas de resonancia magnética potenciadas en T1 con equipo que opera a 1,5 Tesla y de tomografía multidetector de 6 canales se toman luego del proceso de implantación de los electrodos subdurales. Mediante operaciones de procesamiento de imágenes se obtienen representaciones 3D de los electrodos y la corteza cerebral. Estas representaciones son utilizadas durante el proceso de búsqueda del foco epileptógeno. **Resultados:** La técnica ha sido utilizada de manera rutinaria por el grupo de cirugía de epilepsia aportando información relevante sobre la ubicación de los electrodos luego de su proceso de implantación. **Conclusiones:** La técnica presentada es reproducible y ha mostrado ser útil en el grupo de cirugía de epilepsia al facilitar la discusión y validación de hipótesis acerca de la ubicación del foco epileptógeno.

### SUMMARY

**Introduction:** Subdural electrodes play an important role in the study of a high percentage of patients evaluated for epilepsy surgery. The electrical activity outside the surface electroencephalography range can be captured at the subdural level. The reading and stimulation procedures used to locate the epileptogenic zone using subdural electrodes are well established and complications are low. However, these complications tend to increase with the time of permanence of the electrodes in the patient. **Objective:** To suggest a method for the visualization of subdural electrodes for faster decision-making. **Materials and Methods:** Volumetric MRI images, potentiated in T1-using equipment operating at 1.5T and with multi detector 6-channel CT-are acquired after the implementation of subdural electrodes. A 3D visualization is acquired through image processing of the electrodes and the cortex. This visualization is used while searching the epileptogenic focus. **Results:** This technique has been routinely used by the epilepsy surgery group, which in turn supplies relevant information about the location of the subdural electrodes. **Conclusions:** This technique can be reproduced. It has been useful in the epilepsy surgery group, as it has eased the discussion and validation of hypotheses regarding the location of the seizure focus.

<sup>1</sup>Médico neurorradiólogo. Docente de cátedra de Neurorradiología, de la Universidad de Antioquia. Jefe de Resonancia Magnética, del Instituto Neurológico de Colombia. Unidad Neuroimagen Funcional, Instituto Neurológico de Colombia. Director en Radiología, Escanografía Neurológica, Medellín, Colombia.

<sup>2</sup>Ingeniero de sistemas magister en Ingeniería Bioingeniería. Docente de Bioingeniería, Grupo de Investigación en Bioinstrumentación e Ingeniería Clínica (GIBIC), Universidad de Antioquia. Unidad de Neuroimagen Funcional, Instituto Neurológico de Colombia, Medellín, Colombia.

## Introducción

Los electrodos subdurales desempeñan un papel importante en el estudio de un alto porcentaje de pacientes evaluados para cirugía de epilepsia. La actividad eléctrica fuera del rango de la electroencefalografía de superficie puede ser capturada en el espacio subdural. Los procedimientos de lectura y estimulación para localizar la zona epileptógena usando electrodos subdurales están bien establecidos y las complicaciones son bajas, aunque tienden a aumentar con el tiempo de permanencia del paciente con los electrodos (1). De esta manera, conocer la ubicación correcta de los electrodos subdurales agiliza la toma de decisiones, factor que disminuye el tiempo del procedimiento.

La hipótesis de trabajo del grupo de cirugía de epilepsia determina la ubicación que deberán tener los electrodos; a su vez, conocer cuál es en realidad la ubicación final de dichos electrodos luego del procedimiento quirúrgico y su relación con la anatomía del paciente permite plantear nuevas hipótesis y corroborar las previas. El conocimiento de la ubicación de los electrodos depende de la interpretación de diferentes métodos imaginológicos. Los métodos convencionales incluyen la fotografía convencional y los rayos X. La primera alternativa requiere una craneotomía extensa, y solo permite visualizar la relación de los electrodos con la superficie dorsal y lateral. Los rayos X entregan un conjunto reducido de proyecciones a partir de las cuales se obtiene una apreciación global, en la que es difícil conocer las relaciones espaciales que hay entre los electrodos. La figura 1 presenta un par de proyecciones obtenidas por rayos X en las cuales se puede observar la distribución de los electrodos subdurales.

Las técnicas de visualización volumétrica han mostrado tener gran utilidad en el ámbito de la cirugía de epilepsia, en especial para los neurocirujanos: preparan mentalmente al neurocirujano, al mostrar la relación de la lesión con los electrodos y la anatomía tridimensional del paciente (2). Immonen y colaboradores (3) muestran cómo las reconstrucciones tridimensionales a partir de resonancia magnética permiten determinar la ubicación exacta de electrodos subdurales en el área temporomesial. En el estudio de uno de los electrodos frontales estaba capturando información del polo temporal, algo que fue esclarecido mediante la visualización tridimensional, la cual mostraba que el electrodo estaba en contacto con el lóbulo temporal. Este conocimiento fue decisivo en el desenlace quirúrgico del tratamiento.

En el trabajo de Hunter y colaboradores (4) se demuestra que los electrodos se pueden visualizar en reconstrucciones 3D a partir de tomografía con un error mínimo. El aumento de la sensibilidad usando la técnica volumétrica está demostrado al punto que se recomienda su uso en la práctica clínica (2). Esquemas más elaborados de procesamiento han permitido visualizar la relación de los electrodos con elementos corticales y subcorticales (5). Los últimos enfoques utilizan la información volumétrica de tomografía y resonancia fusionada en entornos de neuronavegación, donde se procede de la ubicación de la fuente epileptógena a la resección (6).

El presente trabajo muestra la implementación de una técnica de fusión de información de tomografía y resonancia, acompañada por un conjunto de casos realizados, como parte del protocolo de cirugía de epilepsia de la institución, para la visualización de los electrodos subdurales.

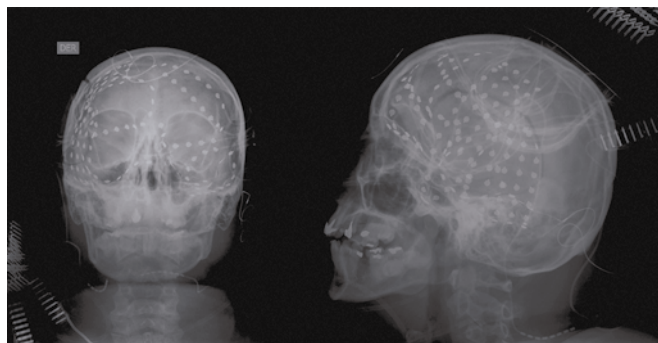


Figura 1. Proyección AP y lateral en la cual se pueden observar los electrodos subdurales. Dado que la imagen de rayos X es una proyección, no es posible conocer exactamente la relación espacial de los electrodos

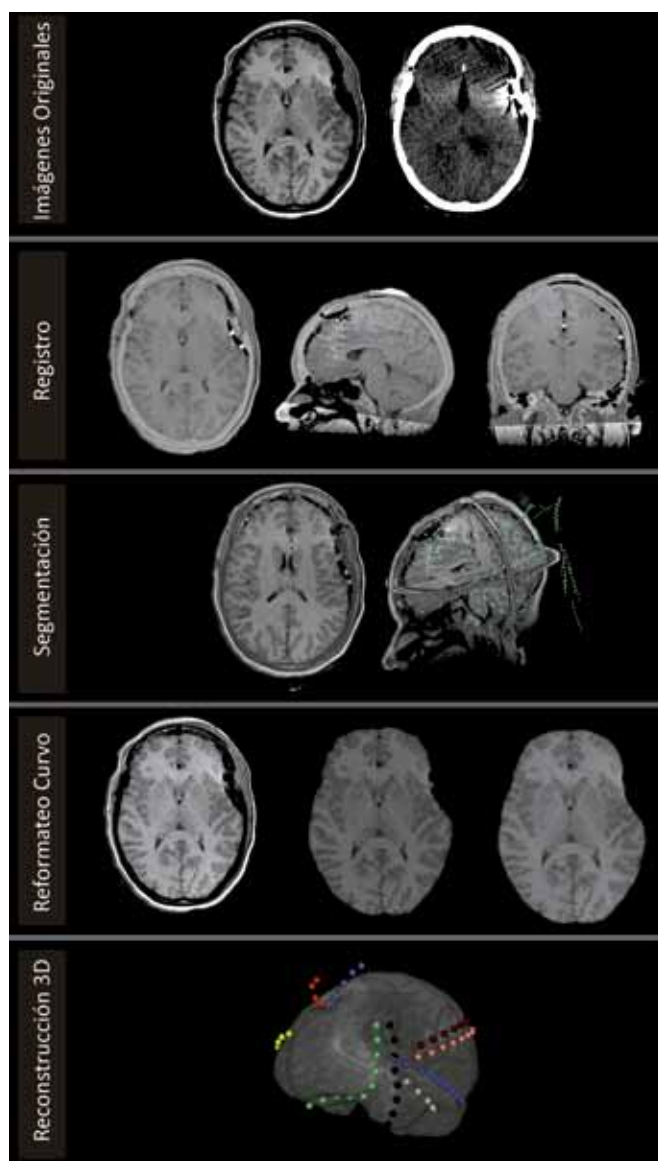


Figura 2. Diferentes etapas en el proceso de obtención de la representación tridimensional de la superficie cerebral y los electrodos

## Materiales y métodos

Imágenes volumétricas de resonancia magnética potenciadas con información en T1, con equipo que opera a 1,5 Tesla (Siemens, Erlangen), y de tomografía multidetectora de seis canales (Siemens, Erlangen) son realizadas luego del proceso de implantación de los electrodos subdurales. Mediante un algoritmo de registro rígido, con posibilidad de prealineación manual, se realiza la fusión de las imágenes. En la imagen de tomografía alineada a la resonancia se realiza la segmentación por umbral de los electrodos, utilizando aquellos vóxeles de la imagen con una densidad superior a los 2000 UH, y reconstrucción 3D, mediante mallas poligonales (7). Estos electrodos son marcados siguiendo la convención de colores y numeración definida por el equipo de neurofisiología.

Mediante reformateo curvo, que consiste en la eliminación de capas sucesivas de corteza siguiendo la curvatura natural del cerebro, se obtiene una representación de la superficie cerebral que mejora la visualización de los giros y los surcos. La información de superficie cerebral, electrodos y posibles zonas lesionales es desplegada en pantalla mediante un algoritmo de visualización directa (*volume rendering*) (7). La figura 2 muestra un esquema de los pasos que constituyen la metodología de posprocesamiento. Para la realización del reformateo curvo se utilizó la herramienta BET (Brain Extraction Tool) (8) y rutinas propias implementadas a partir de SPM (9), siguiendo el esquema propuesto por Huppertz y colaboradores (10). Para los pasos restantes se utilizaron rutinas modificadas del programa 3Dslicer (11-13). El *software* 3Dslicer, BET y SPM son de libre distribución, y las rutinas implementadas fueron orientadas hacia la facilidad de uso más que hacia la modificación de parámetros o algoritmos existentes en los programas utilizados.

## Resultados

La técnica que se presenta es utilizada rutinariamente por el grupo de cirugía de epilepsia desde el último trimestre del 2010. Se ha usado para relacionar los hallazgos electrofisiológicos con las hipótesis previas a la invasión y la anatomía de la superficie cerebral del paciente. Los posibles desplazamientos de los electrodos posteriores a la toma de las imágenes no han sido tenidos en cuenta, dado que estudios previos establecen que podrían ser menores de 5 mm (14). A continuación se exponen algunos casos que ilustran la utilidad de la técnica.

Paciente 1: Mujer de 32 años de edad con epilepsia focal sintomática, con imagen estructural que demostró un foco gliótico subyacente al giro frontal superior izquierdo. La invasión consistió en la ubicación en el hemisferio izquierdo de 2 rejillas de 32 electrodos, y 5 tirillas de 8 electrodos, una de ellas sobre el hipocampo (figura 3). Por electrofisiología se encontró actividad frontal izquierda debajo del electrodo 15 de la rejilla frontal (electrodos morados). El diagnóstico histopatológico fue displasia cortical.

Paciente 2: Niño de 12 años de edad con epilepsia focal motora. La imagen estructural no demostró alteración. Por electrofisiología se encontró actividad frontal. La invasión se realizó con 2 rejillas de 32 electrodos, y una tirilla de 8 electrodos sobre el hemisferio derecho (figura 4). Se reseccó la corteza subyacente al contacto N° 8 de la tirilla y al contacto N° 32 de la rejilla frontal, región en la que se demostró actividad eléctrica compatible con displasia, información que fue corroborada por histopatología.

Paciente 3: Hombre de 39 años de edad con epilepsia refractaria de lóbulo temporal izquierdo. La invasión se realizó con 24 electrodos repartidos en tres tirillas: una frontobasal y dos temporales. La resección se hizo alrededor del electrodo cuatro de la tirilla temporal anterior (electrodos verdes), en la región que corresponde al polo temporal (figura 5), con diagnóstico histopatológico de displasia cortical tipo IIA.

Paciente 4: Hombre, 40 años, antecedente de astrocitoma frontal izquierdo grado II, tratado previamente con cirugía y radioterapia. Consultó por epilepsia refractaria. La imagen estructural mostró malacia frontal izquierda extensa con cavitación quística nucleobasal ipsolateral, sin signos de viabilidad tumoral. Por electrofisiología se encontró actividad frontal izquierda. La figura 6 muestra la representación 3D de la invasión con 2 rejillas de 32 electrodos y 5 tirillas de 8 electrodos, con una de ellas sobre el hipocampo. Se reseccó el tejido subyacente a los contactos, donde se detectó actividad eléctrica anómala (rejilla frontal) con un diagnóstico definitivo de gliosis.

A la fecha, se ha utilizado la técnica de visualización tridimensional de electrodos en siete procedimientos de invasión. En dos pacientes no se realizó resección del foco epileptógeno, dado que no se presentaron crisis que fueran concluyentes. Los pacientes a los cuales se les practicó resección se encuentran libres de crisis.

## Discusión

Winkler y colaboradores presentan un método de visualización de electrodos basado en la imagen de resonancia y tomografía sin fusionar (2); este trabajo utiliza un esquema de fusión automático que agiliza y hace reproducible el procedimiento.

Este método permite obtener una representación explícita de los electrodos en la convención definida por el grupo de electrofisiología, dada por los colores y la numeración, en las dimensiones originales del estudio, elemento que representa una ventaja frente al planteamiento de Kovalev y cols. (15), donde se utiliza el artefacto de susceptibilidad que produce el electrodo en la imagen de resonancia como referencia de ubicación de este.

Debido a que la colocación de los electrodos puede generar efectos colaterales, como hematomas epidurales o subdurales, la visualización de los electrodos no se realiza en una resonancia previa a su implantación, conducta concordante con lo propuesto por Kovalev y colaboradores. Estos trabajan con la imagen obtenida luego de la implantación, ya que puede tener información nueva de utilidad diagnóstica y captura la conformación real del parénquima luego de la cirugía (15).

Immonen y cols. definen un sistema coordinado para relacionar la ubicación de los electrodos en tomografía con la resonancia (3), situación innecesaria en nuestro enfoque, dado que la fusión automática permite obtener la relación directa entre los electrodos y la corteza cerebral. Schulze-Bonhage y cols. utilizan herramientas para colorear las zonas patológicas y reformateo curvo para visualización de los elementos subcorticales (5). Al respecto, nuestro método utiliza el mismo sistema de marcas que se usa con los electrodos para señalar posibles zonas patológicas, y utiliza el reformateo para mejorar la visualización de la superficie cerebral.

En términos generales, se coincide con todas las técnicas expuestas en la ganancia en visibilidad que se obtiene al utilizar el enfoque volumétrico, elemento que se ha corroborado, pues el procedimiento es un paso importante dentro del protocolo de cirugía de epilepsia, el cual otorga información que facilita la discusión de hipótesis entre los neurólogos, neurofisiólogos, neurorradiólogos y neurocirujanos.

El proceso de reformateo que permite una mejor visualización de la superficie cerebral lo hace a costa de la eliminación de vóxeles en el volumen de resonancia. Esto genera el efecto visual de electrodos sin contacto con la corteza. Aunque es un efecto conocido por el grupo de cirugía de epilepsia, que no genera problemas en la interpretación, no deja de ser un factor por mejorar de la propuesta.



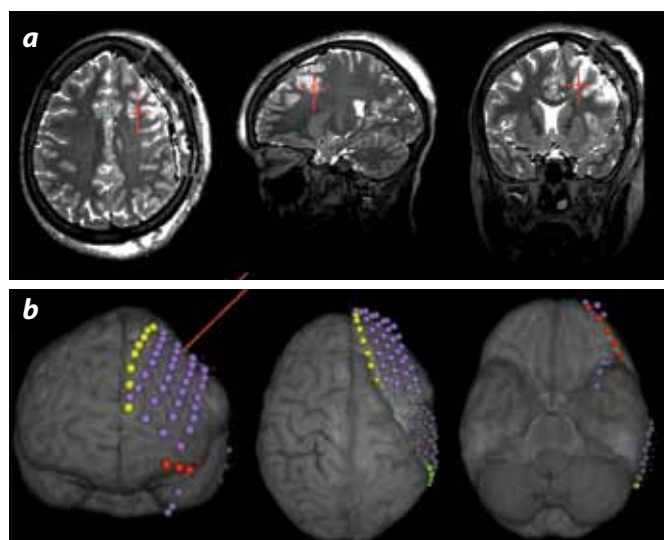


Figura 3. (a) Hiperintensidad subcortical frontal izquierda con información de T2; (b) representación 3D de la fusión que muestra 2 rejillas de 32 electrodos y 5 tirillas de 8 electrodos. La lesión se ubicó 3 cm subyacente al contacto N° 15 de la rejilla frontal

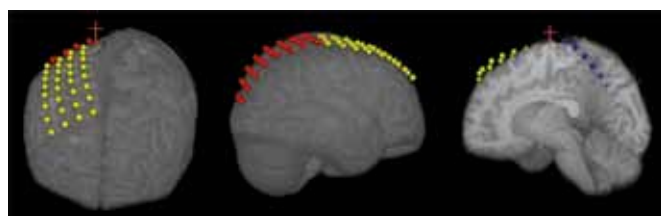


Figura 4. Representación 3D final de la invasión con 2 rejillas de 32 electrodos y una tirilla de 8 electrodos. Se resecó la corteza subyacente al contacto N° 8 de la tirilla y al contacto N° 32 de la rejilla frontal

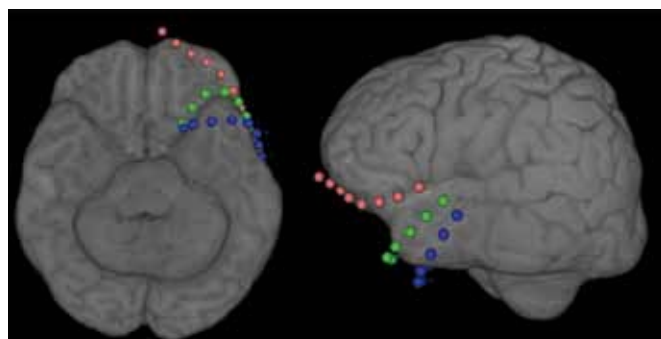


Figura 5. Vista inferior e izquierda de la superficie cerebral del paciente 3 con las tres tirillas de ocho electrodos usadas. El foco se localizó en la zona del electrodo 4 de la tirilla temporal anterior (marcas verdes)

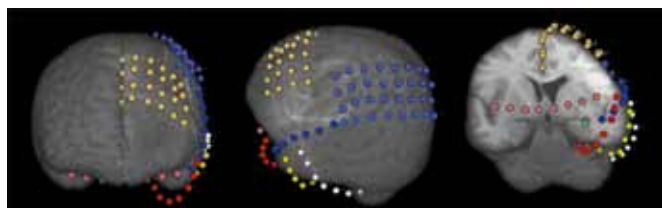


Figura 6. Representación 3D de la invasión con 2 rejillas de 32 electrodos y 5 tirillas de 8 electrodos con la mayor parte de los contactos sobre el hemisferio izquierdo. Diagnóstico definitivo: gliosis

## Conclusiones

En todos los casos presentados, la técnica ha sido de un valor único, ya que ha permitido una correlación directa entre la anatomía del paciente, las hipótesis previas al proceso de invasión y el registro electroencefalográfico, factores importantes en la delimitación de la zona epileptógena. Teniendo en cuenta que el primer paciente tiene cerca de un año de operado, se resalta la necesidad de continuar con el seguimiento de todos los pacientes, y recolectar casos nuevos, para medir el impacto real del uso de la técnica, de acuerdo con escalas que permitan cuantificar los resultados quirúrgicos.

Se ha presentado una técnica que se puede implementar mediante diferentes aplicaciones de *software* libre y que permite obtener representaciones 3D que integran la anatomía del paciente, las posibles lesiones y la ubicación de los electrodos, ya sean rejillas o tirillas. La técnica es reproducible, y se puede practicar siempre que se cuente con los equipos de imagen y se asegure la compatibilidad de los electrodos con el entorno de resonancia.

**Agradecimientos:** Al grupo de tecnólogos del INC, por su ayuda en la preparación del protocolo de imágenes.

## Referencias

- Nair D, Burgess R, McIntyre C, et al. Chronic subdural electrodes in the management of epilepsy. *Clinical Neurophysiology*. 2008;119:11-28.
- Winkler PA, Vollmar C, Krishnan KG, et al. Usefulness of 3-D reconstructed images of the human cerebral cortex for localization of subdural electrodes in epilepsy surgery. *Epilepsy Res*. 2000;41:169-78.
- Immonen A, Jutila L, Könönen M, et al. 3-D reconstructed magnetic resonance imaging in localization of subdural EEG electrodes. Case illustration. *Epilepsy Res*. 2003;54:59-62.
- Hunter JD, Hanan DM, Singer BF, et al. Locating chronically implanted subdural electrodes using surface reconstruction. *Clin Neurophysiol*. 2005;116:1984-7.
- Schulze-Bonhage AHJ, Huppertz HJ, Comeau RM, et al. Visualization of subdural strip and grid electrodes using curvilinear reformatting of 3D MR imaging data sets. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2002;23:400-3.
- Kamida T, Anan M, Shimotaka K, et al. Visualization of subdural electrodes with fusion CT scan/MRI during neuronavigation-guided epilepsy surgery. *J Clin Neurosci*. 2010;17:511-3.
- Preim B, Bartz D. *Visualization in medicine: theory, algorithms, and applications*. 1st ed. Burlington, MA: Morgan Kaufmann; 2007.
- Smith SM. Fast robust automated brain extraction. *Human Brain Mapping*. 2002;3:143-55.
- Ashburner J. SPM: A history. *NeuroImage*. 2012;62:791-800.
- Huppertz HJ, Kassubek J, Altenmüller DM, et al. Automatic curvilinear reformatting of three-dimensional MRI data of the cerebral cortex. *Neuroimage*. 2008;39:80-6.
- Pieper S, Lorenzen B, Schroeder W, et al. The NA-MIC Kit: ITK, VTK, pipelines, grids and 3D slicer as an open platform for the medical image computing community. *Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Biomedical Imaging Nano to Macro*. 2006;1:698-701.
- Pieper S, Halle M, Kikinis R. 3D SLICER. *Proceedings of the 1st IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro*. 2004;1:632-5.
- Gering DT, Nabavi A, Kikinis R, et al. An Integrated visualization system for surgical planning and guidance using image fusion and interventional imaging. *Int Conf Med Image Comput Assist Interv*. 1999;2:809-19.
- LaViolette PS, Rand SD, Ellingson BM, et al. 3D visualization of subdural electrode shift as measured at craniotomy reopening. *Epilepsy Research*. 2011;94:102-9.
- Kovalev D, Spreer J, Honegger J, et al. Rapid and fully automated visualization of subdural electrodes in the presurgical evaluation of epilepsy patients. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2005;26:1078-83.

## Correspondencia

José Luis Ascencio  
Instituto Neurológico de Colombia  
Calle 55 N.º 46-36. Medellín, Colombia  
jotaascencio@yahoo.com

Recibido para evaluación: 11 de septiembre de 2012  
Aceptado para publicación: 5 de diciembre de 2012