

# Utilización de la neuronavegación en procedimientos neuroquirúrgicos



**DR. MARCELO FERREIRA**

### AUTORES

**DRES. MARCELO FERREIRA,  
SANTIAGO CONDOMÍ ALCORTA,  
ANDRÉS CERVIO, JORGE SALVAT**

*Neurocirujanos  
Departamento de Neurocirugía,  
Instituto FLENI  
Buenos Aires, Argentina  
maferreira@fleni.org.ar*

### Resumen

**Introducción:** La localización intracraneal supone un reto para los neurocirujanos, ya que deben contar con un preciso sentido de orientación espacial tridimensional, para ello la neuronavegación proporciona una orientación espacial sobre imágenes preoperatorias.

**Material y métodos:** Revisión retrospectiva de pacientes en los cuales se utilizó neuronavegación periodo Octubre-1999 Marzo-2007 con un total de 251 pacientes. Se utilizó 2 sistemas de navegación 1\_ Electa Insight tm/Viewscope, 2\_ BRAIN LAB VectorVision Cranial / ENT. Se utilizó un Microscopio LEICA OHS. Cabezal de Mayfiel. Los registros se realizaron con sistema de fiduciales autoadhesivos 4 a 6 y con puntero Softouch que cuenta con sensor para la detección de piel y emite una señal de luz LED.

**Resultado:** En un rango etario de 5 a 75 años se operaron con neuronavegación pacientes con diagnósticos: 201 tumores / Cavernomas 23 / Inflamatorias infecciosas 5 / Quistes 7 / Cirugías de epilepsia 8 / Endoscópicas 7.

**Discusión:** Este sistema de localización intracraneal permite realizar abordajes más pequeños, trayectorias más cortas, identificar límites de lesiones de bajo grado, localización de estructuras elocuentes, biopsias de áreas de mayor agresividad. Presenta desventajas como: no es en tiempo real, correlaciona la cirugía con imágenes preoperatorias lo cual pueden alterarse con drogas, evasión de LCR, retracción cerebral con espátulas, curva de aprendizaje.

**Conclusión:** Si bien la neuronavegación nunca reemplazara al profundo conocimiento de la anatomía del SNC ni la destreza del quirúrgico del cirujano, es una herramienta de suma utilidad en el campo neuroquirúrgico.

**Palabras claves:** cirugía intracraneana, neuronavegación.

## Abstract

**Objectives:** To present our experience with Neuronavigation system in intracranial surgery.

**Material and Methods:** The use of neuronavigation system was evaluated in 251 consecutive patients operated on during the period October 1999-March 2007 (Range of age: 5 months-75 years). Surgical procedures included the resection of brain tumor, arteriovenous malformation, cavernous angiomas and epilepsy surgeries. The neuronavigation system is the Elekta InSight - View scope and BRAIN LAB VectorVision Cranial /ENT.

**Results:** The additional time required for pre-surgery organization of the Neuronavigation system was 15-20 minutes. There were differences during the registration process related to the surgical position (prone, supine and park-bench). The reference system registered movements in 5 patients. Neuronavigation system allows preoperative planning of the surgical approach, to guide endoscopic procedures, perform smaller craniotomies, localize deep-seated subcortical lesions, identify the boundaries of low-grade tumors and evaluate the extent of resection in epilepsy surgeries.

**Conclusions:** Neuronavigation system improves the surgical approach of intracranial surgeries allowing shortening the surgery procedure time, defining the less invasive way, and identifying the margins of low-grade lesions.

**Key words:** Intracranial surgery, neuronavigation.

## Introducción

A diferencia de otras especialidades en el cual el campo visual quirúrgico es amplio, la localización intracraneal supone un reto para los neurocirujanos que deben contar con un preciso sentido de la orientación espacial tridimensional de la anatomía cerebral.

La adquisición de esta habilidad constituye una gran parte del aprendizaje de cada neurocirujano, es una experiencia quirúrgica continuada. Esto proporciona un sentido espacial que sirve de guía durante la cirugía. Sin embargo, las variaciones anatómicas debida al proceso patológico, las cirugías previas y la limitación del campo visual hacen muchas veces difícil la orientación intraoperatoria.

Para resolver este problema se han desarrollado múltiples sistemas para ayudar al cirujano en la localización intracerebral. El primer sistema de estereotaxia y navegación espinal fue utilizado por Woroschiloff en 1874 para investigaciones neurofisiológicas en médula espinal de conejos. En marzo de 1889, D. N. Zernov, del Hospital de Moscú, inició la era de la navegación intracraneal utilizando un marco de aluminio fijado horizontalmente al cráneo y utilizando sistemas de coordenadas polares.

Sin embargo, no fue sino hasta 1947 cuando E. A. Spiegel y H. T. Wycis introdujeron el método estereotáxico en la práctica clínica a través de la utilización de radiografías intraoperatorias biplanares ortogonales para la guía en el abordaje quirúrgico. El advenimiento de la TAC y la RMN implicó una revolución y universalización de las técnicas estereotáxicas.<sup>1</sup>

El término neuronavegación fue introducido por Watanabe<sup>2</sup>. Consiste en un método técnico de orientación espacial intracraneal o intraespinal intraoperatorio a través de la superposición de las estructuras anatómicas con las imágenes de TAC o RMN preoperatorios, permitiendo al neurocirujano una guía interactiva por la imagen.

La idea básica, ajustándonos a la definición de R. L. Galloway<sup>3</sup>, es la de «localizar la posición quirúrgica en el espacio físico y presentar la posición en el espacio de imagen». Watanabe et al.<sup>4</sup> describieron un sistema de navegación basado en un brazo con potenciómetros en las articulaciones. En el año 1986, Roberts et al.<sup>5</sup> y más tarde Barnett et al.<sup>6</sup> utilizaron un sistema de navegación basado en digitalizadores ultrasónicos (principio del «spark gap», literalmente «intervalo de chispa»). Kato et al.<sup>7</sup> utilizaron un sistema de navegación basado en un digitalizador tridimensional con detectores de campos magnéticos para determinar la posición espacial de los instrumentos quirúrgicos. Ryan et al.<sup>8</sup> usaron un sistema basado en diodos emisores de luz (LED) que eran detectados por dos o más cámaras.

Los sistemas actuales, a diferencia de los sistemas de detección activa de los LED, se basan en la reflexión pasiva de los flashes infrarrojos sobre los LED.<sup>1,9-11</sup>

## Objetivos

Analizar nuestra experiencia en el uso de la neuronavegación en procedimientos intracraneales.

Evaluar las diferencias en la precisión en función del método empleado para el registro (fiduciales adhesivos cutáneos en comparación al reconocimiento facial).

Determinar los motivos de error en la utilización del sistema.

Establecer si la utilización de la neuronavegación acorta o prolonga la duración de los procedimientos neuroquirúrgicos.

Establecer un correlato entre la resección quirúrgica planificada por neuronavegación y el resultado final.

Identificar las posiciones quirúrgicas que ocasionan dificultad para la utilización del sistema.

Evaluar los márgenes de resección quirúrgica en tumores intracerebrales de bajo grado.

## Pacientes y métodos

Se realizó una revisión retrospectiva de los pacientes en los cuales se utilizó neuronavegación en el periodo octubre 1999 - marzo 2007, con un total de 251 pacientes. El rango etario fue de 5 a 75 años, sin predilección de sexo.

Los criterios de inclusión de los pacientes fueron: tumores en área elocuente, hemisferio dominante, cavernomas de menos de 2 cm, tumores de tronco, oligodendrogliomas y otras lesiones de bajo grado.

## Procedimiento

A los pacientes seleccionados se les realizó RMN de cerebro con protocolo de neuronavegación, previamente establecido, generalmente el día previo a la cirugía.

Posteriormente, en el quirófano se solicita al Servicio de Imágenes el traslado de las imágenes a la estación de planificación en donde se convierten las imágenes a formato de archivo BrainLab® y se realiza la planificación quirúrgica considerando todos los aspectos tales como trayecto quirúrgico, distancia desde la corteza a la lesión y volumetría lesional.

Una vez concluido esto se pasa al neuronavegador.

Una vez premedicado el paciente con antibióticos (generalmente una cefalosporina) EV y anestesiado con un opiáceo, se procede a colocar el cabezal de Mayfield® para fijar la cabeza del paciente; se fija al cabezal la estrella de referencia con las esferas que reflejan la luz (LED) del neuronavegador. Una vez que el neuronavegador recolecta los reflejos infrarrojos de los marcadores, se efectúa la digitalización y luego se procede a la neuronavegación.

## Obtención de las imágenes

La obtención de las imágenes preoperatorias se realiza la noche previa o una hora antes de la cirugía con un resonador General Electric 1.5T, Signa Excite 1.5 T (Milwaukee, Wisconsin, USA), con la visualización de secuencias T1 y T2 en base a la patología específica.

Los parámetros de adquisición de imágenes fueron: Secuencias volumétricas 3D fast SPGR (spoiled gradient echo) ponderadas en T1; cortes de 1.5 mm. de espesor, 124 cortes; número de adquisiciones o excitaciones (NEX): 1; matriz de adquisición: 256 x 256 mm.; ángulo de basculación («flip angle»): 40°; campo de visión (FOV): 24x18; tiempo de repetición (TR): 35 ms.; tiempo de eco (TE): 5 ms.

En tumores de bajo grado que no captaron el contraste paramagnético (Gadolinio) se usó la secuencia T2. Los parámetros fueron: Secuencias Turbo espín eco 2D ponderadas en T2; cortes de 3 mm. de

espesor, 35 cortes; NEX: 2; matriz: 256 x 256 mm.; «flip angle»: 20°; TR: 6000 ms.; TE: 102 ms.

## Sistema de Navegación

Los equipos de neuronavegación utilizados fueron:

- Elekta InsightTM/ViewScope® (Elekta instrument).

- BRAIN LAB VectorVision Cranial / ENT® (BrainLab, AG, Heimstetten, Alemania).

Desde mayo del 2006 se utilizó el sistema de guía de imagen tipo VectorVision compact® con el programa VectorVision Cranial / ENT® (BrainLab, AG,



Figura 1. Neuronavegador tipo VectorVision Cranial/ ENT®

Heimstetten, Alemania). (Figura 1)

A diferencia de los sistemas de navegación tradicionales no requiere de cables, baterías ni pedales. En lugar de ello, el equipo utiliza esferas marcadoras reflectantes y dos cámaras emisoras de infrarrojos que emiten destellos de luz infrarroja.

Las esferas marcadoras reflectantes se fijan a los instrumentos quirúrgicos y a una estrella de referencia fija al cabezal. Cada una de estas esferas refleja los destellos de luz infrarroja procedentes de las cámaras generando una imagen infrarroja única.

Los reflejos infrarrojos de los marcadores son digitalizados por las cámaras, cada una de las cuales «detecta» la posición de las esferas marcadoras reflectantes desde un ángulo diferente. El software utiliza ambas imágenes para calcular la posición tridimensional de los marcadores de los instrumentos con relación a la posición de los marcadores de la estrella de referencia.<sup>1</sup> (Figura 2)



Figura 2. Estrella de referencia.

Una vez finalizado el registro del paciente queda definida de forma precisa la posición de la cabeza y del instrumental quirúrgico respecto a la misma.

Utilizamos los softwares: iPlan Cranial®, versión 2.5 (BrainLab, AG, Heimstetten, Alemania), software de planificación, y PatXfer®, versión 5.2, software para transformación de imágenes en formato DICOM a formatos de archivo BrainLab®.

## Registro

Para el registro se debe medir las coordenadas del espacio físico en las cuales está inmerso el objeto. Para ello se requiere unas marcas, ya sea referencias anatómicas del paciente o bien marcas externas como los fiduciales. Clásicamente se ha utilizado de 3 a 5 fiduciales pegados a la cabeza del paciente.<sup>1</sup> Actualmente existen sistemas de escaneo facial que realizan un reconocimiento facial en relación a las imágenes radiológicas adquiridas (Z-Touch® y Softouch®, ambas de BrainLab, AG, Heimstetten, Alemania) con los cuales se elimina la necesidad de marcadores fiduciales para efectuar el registro. Teóricamente, este registro sin marcas elimina los posibles errores producidos por la identificación subjetiva de las marcas anatómicas, la reproductibilidad de los fiduciales y el desplazamiento inadvertido de la piel.

Nosotros empleamos un puntero Softouch® (BrainLab) diseñado para registrar al paciente y para la navegación quirúrgica. Este instrumento está precalibrado equipado; se encuentra equipado con tres esferas marcadoras reflectantes de manera que las cámaras pueden detectar su posición y + con un sensor de detección de la piel que emite una señal de luz infrarroja en el momento que entra en contacto con la piel del paciente. Con este puntero se puede digitalizar puntos cuando entra en contacto con la piel sin que esto suponga un desplazamiento de tejidos. En base a estos puntos, un algoritmo de cálculo de superficies transfiere la posición actual del paciente a las imágenes de diagnóstico del mismo. (Figura 3)



Figura 3. Puntero Softouch® precalibrado.

En los primeros casos nosotros no obtuvimos buenos registros, teniendo que repetir el procedimiento en algunas oportunidades hasta 5 veces, lo que prolongó el tiempo quirúrgico. El registro cutáneo, empleando el puntero Softouch®, es utilizado de rutina en pacientes sometidos a cirugía en posición decúbito supino y generalmente para registrar puntos en la cara, en las zonas periorbitarias y en la región malar.

En pacientes portadores de patologías que para el abordaje quirúrgico requieren ser colocados en la posición decúbito prono o lateral utilizamos los fiduciales adhesivos cutáneos. Para ello, primero se realiza el rasurado y limpieza de la piel con alcohol, posteriormente se pega un fiducial de doble cara. Se usó la esfera azul adosada al soporte plástico en caso de TC y la esfera verde llena de aceite orgánico en caso de RMN.

Utilizamos de 4 a 6 fiduciales bilateralmente sobre las prominencias óseas y siempre cerca del área quirúrgica.<sup>12</sup> En caso de desprendimiento de los fiduciales, a pesar de estar previamente marcados con marcador indeleble, preferimos no recolocarlos. Fueron de particular utilidad en los casos de tumores de fosa posterior, parietales posteriores y occipitales. (Figuras 4 y 5)

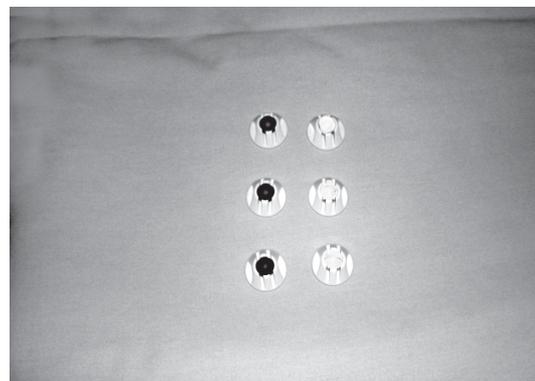


Figura 4. Fiduciales adhesivos cutáneos azules (los ubicados a la izquierda) para TC y verdes para RMN.



Figura 5. Fiduciales adhesivos y puntero localizador.

### Planificación quirúrgica

Después de la transferencia de las imágenes desde el resonador a la estación de planificación del VectorVision Cranial / ENT® a través de CD o intranet, se procede a identificar las estructuras a reseccionar, las áreas elocuentes, las estructuras vasculares, etc. En seguida se realiza la reconstrucción tridimensional y triplanar (secciones sagitales y triplanares). (Figura 6)



Figura 6. Estación de planificación.

La planificación incluye el diseño de la trayectoria más adecuada para evitar áreas elocuentes, seleccionar la trayectoria más corta, realizar mediciones, evaluar la extensión de las lesiones de bajo grado, resaltar estructuras vasculares, calcular el tamaño de los ventrículos, etc. (Figuras 7,8,9,10)

Para la endoscopia también se efectúa la calibración del instrumental, para darnos orientación y profundidad intracraneal, usando una matriz de calibración.<sup>13</sup> (Figura 11).

Posteriormente, toda la información se transfiere a la estación de trabajo VectorVision compact® vía intranet.

\* Cuando se requirió la calibración del instrumental se utilizó una matriz de calibración.

\* El microscopio utilizado fue un LEICA OHS®, M500-N, con una cámara BIV 3CCD.

### Resultados

Durante el período octubre 1999 - marzo 2007, fueron intervenidos quirúrgicamente utilizando la neuronavegación 251 pacientes por distintas patologías intracraneales. El rango etario fue de 5 a 75 años.

Los diagnósticos posquirúrgicos fueron: Tumores: 201 pacientes, cavernomas: 23, patologías inflamatorias infecciosas: 5, quistes: 7, cirugía de epilepsia: 8 (Figuras 9 y 12), cirugías endoscópicas: 7.

En siete pacientes se registró movimientos del cabezal de Mayfield.

Se comprobó que en la posición decúbito prono los registros con fiduciales adhesivos fueron más eficientes.

El tiempo requerido para la utilización de la neuronavegación fue de 15 a 20 minutos.

### Discusión

La neuronavegación fue creada para facilitar la orientación tridimensional del neurocirujano en los procedimientos quirúrgicos intracraneales en tiempo real durante el acto quirúrgico respecto a las imágenes obtenidas preoperatoriamente.<sup>14</sup> (Figura 12)

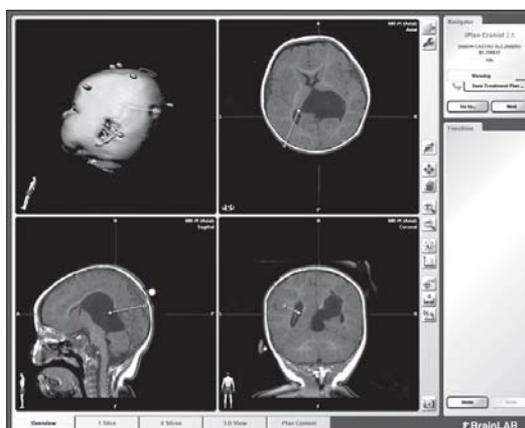


Figura 7. Tumor parieto-occipital. Volumetría tumoral.

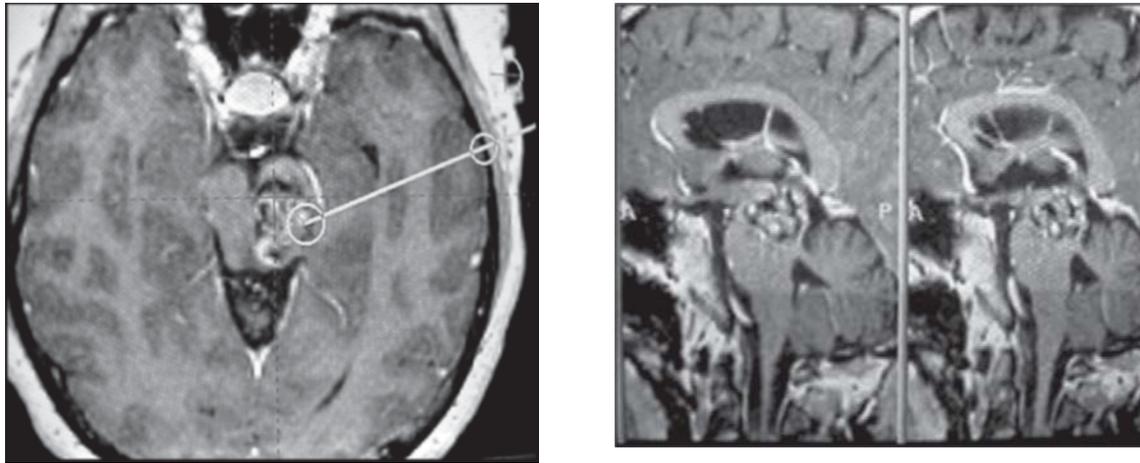


Figura 8. Tumor parietal. Planificación tridimensional.

---

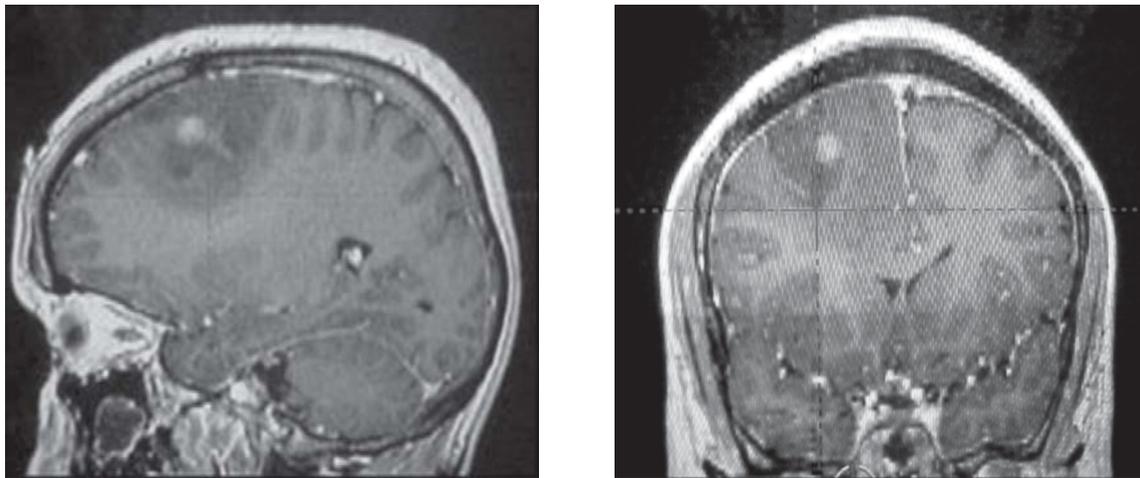


Figura 9. Paciente con diagnóstico de tumor de bajo grado manifestado por crisis epilépticas. Localización de los márgenes quirúrgicos.

---

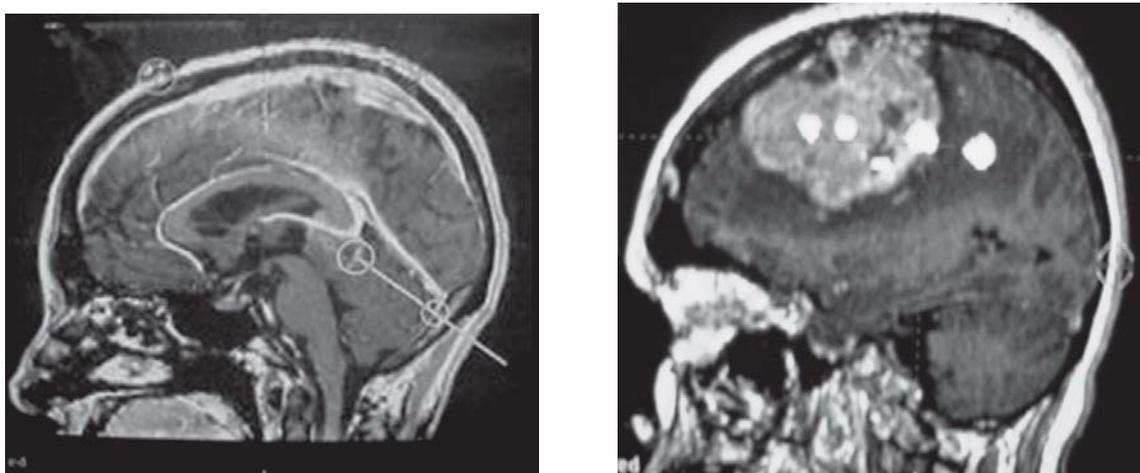
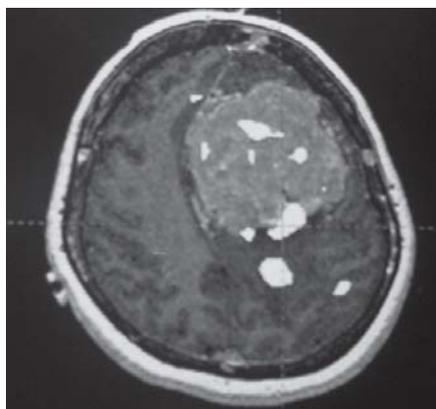


Figura 10. Paciente con diagnóstico de cavernoma de tronco cerebral. Planificación de la trayectoria quirúrgica.

---



(Figura 11). Planificación de la trayectoria del endoscopio para neuroendoscopia.

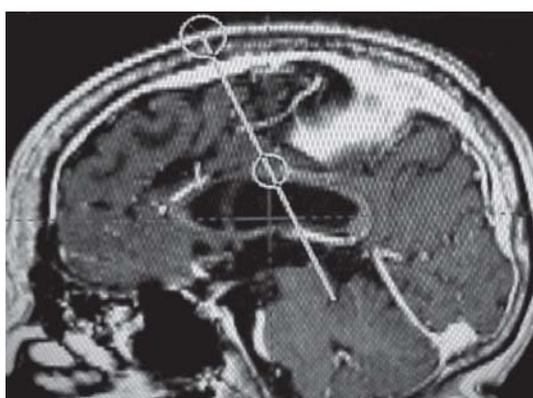


Figura 12. Cirugía de epilepsia. Medición de la extensión de la callosotomía.

Permite la localización de blancos más pequeños al permitir la planificación más precisa del abordaje, con el consiguiente menor requerimiento de analgesia, menor dolor posquirúrgico y un tiempo de hospitalización más corto.<sup>10,11</sup> (Figura 13)

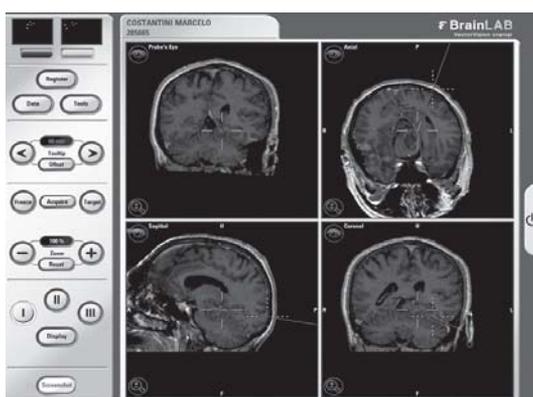


Figura 13. Paciente con diagnóstico de tumor pineal. Planificación del abordaje quirúrgico.

Permite planificar trayectorias más cortas, respetar las estructuras elocuentes, identificar los márgenes de los tumores de bajo grado y efectuar la biopsia de las áreas tumorales de mayor agresividad.<sup>14-16</sup> (Figura 14)

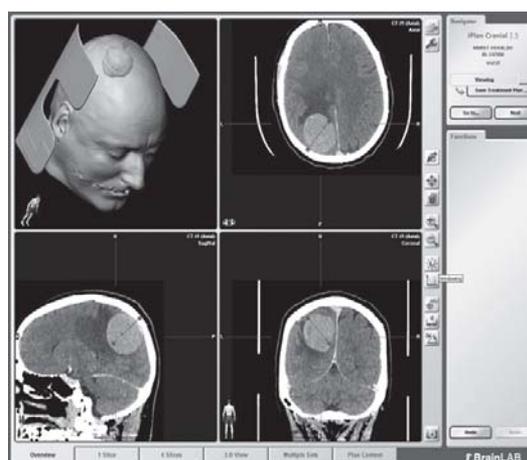


Figura 14. Paciente con diagnóstico de tumor de tronco. Planificación de la trayectoria.

La fusión de imágenes funcionales permite delimitar las relaciones entre los márgenes de la lesión intracraneal y las áreas elocuentes estudiadas.<sup>17,18</sup> (Figura 15)

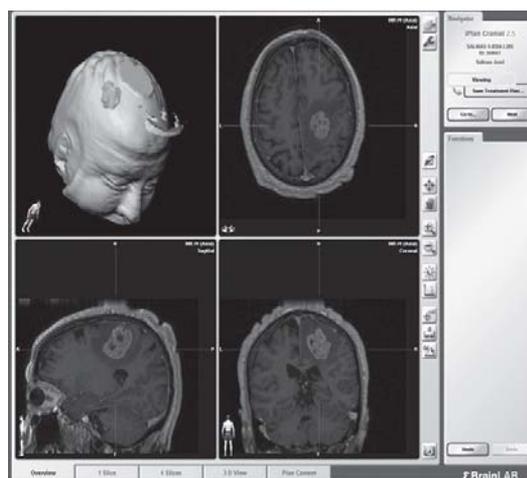


Figura 15. Fusión de imágenes funcionales delimitando las relaciones entre el margen tumoral posterior y el área de representación cortical de la mano derecha.

Wu et al. compararon los resultados de pacientes operados de lesiones tumorales en regiones eloquentes usando neuronavegación solamente o fusionando las imágenes funcionales de RMN y encontraron que la tasa de resección completa aumentó de 60.7% a 86.7% cuando se pudo identificar las áreas funcionales en el neuronavegador.<sup>19</sup>

Los avances tecnológicos no sólo permiten fusionar imágenes funcionales de RMN sino también las de ecografía intraoperatoria disminuyendo el margen de error del procedimiento.<sup>20,21</sup>

En procedimientos endoscópicos la neuronavegación permite guiar la trayectoria del endoscopio en casos de ventrículos pequeños o quistes profundos.<sup>22</sup>

Respecto a la cirugía de hipófisis operados por vía trans-septoefenoidal (TSE), Zhao et al.<sup>23</sup> han reportado la utilidad del neuronavegador al disminuir la necesidad de fluoroscopia intraoperatoria. Sin embargo, preferimos la realización de la cirugía por vía TSE sin fijar la cabeza lo que nos permite movilizarlo durante la cirugía para poder realizar la remoción tumoral con mayor comodidad. En estos casos consideramos más útil la utilización de la neuroendoscopia.

Jung et al.<sup>24</sup> describen la utilización del neuronavegador para realizar biopsias estereotácticas sin marco.

Creemos que es posible esto en lesiones profundas no muy pequeñas para disminuir el margen de error.

Las principales desventajas del neuronavegador es que correlaciona la cirugía con las imágenes preoperatorias. Esto implica que la evacuación del LCR, la retracción del tejido cerebral con espátula, las modificaciones del espacio intravascular con drogas tipo Manitol o la hiperventilación pueden influenciar en la localización intraoperatoria aumentando el margen de error.

Willems et al.<sup>25</sup> describen el desplazamiento cerebral después de la adquisición de imágenes como el principal problema a resolver en la neuronavegación.

En las lesiones de base de cráneo la certeza del procedimiento es mayor debido a la poca distorsión que la evacuación del LCR produce en las estructuras anatómicas basales.<sup>11</sup>

En los tumores primarios de bajo grado la neuronavegación nos permitió acortar los tiempos quirúrgicos al evitar la toma de muestras para congelación de los márgenes de la lesión.

Si la utilización de la neuronavegación es más frecuente, el tiempo destinado a su utilización será más corto.

Hubo mayor dificultad para el uso adecuado del neuronavegador cuando las lesiones se ubicaban en la fosa posterior, pero se mejoró con el uso de fiduciales adhesivos. El registro con el escáner facial (Softouch®) demanda tiempo y prolonga el tiempo quirúrgico y, en nuestra experiencia, proporciona menor precisión que con los fiduciales adhesivos.

Si bien la neuronavegación nunca reemplazará al profundo conocimiento de la anatomía del SNC ni la destreza quirúrgica del cirujano, es una herramienta de suma utilidad en el campo neuroquirúrgico actual. (Figura 16)

## Conclusiones

En nuestra experiencia, la neuronavegación fue de suma utilidad para la planificación de craneotomías más pequeñas, la localización de lesiones pequeñas subcorticales y la evaluación de márgenes tumorales en lesiones de bajo grado.

Respecto a este último punto es importante señalar que una vez iniciada la resección quirúrgica del tumor con la técnica del vaciamiento intralesional, los márgenes tumorales pueden desplazarse y no coincidir con las imágenes preoperatorias pudiendo aumentar el riesgo de reseca tejido sano. Consideramos importante marcar los márgenes de la lesión previamente a la resección quirúrgica.

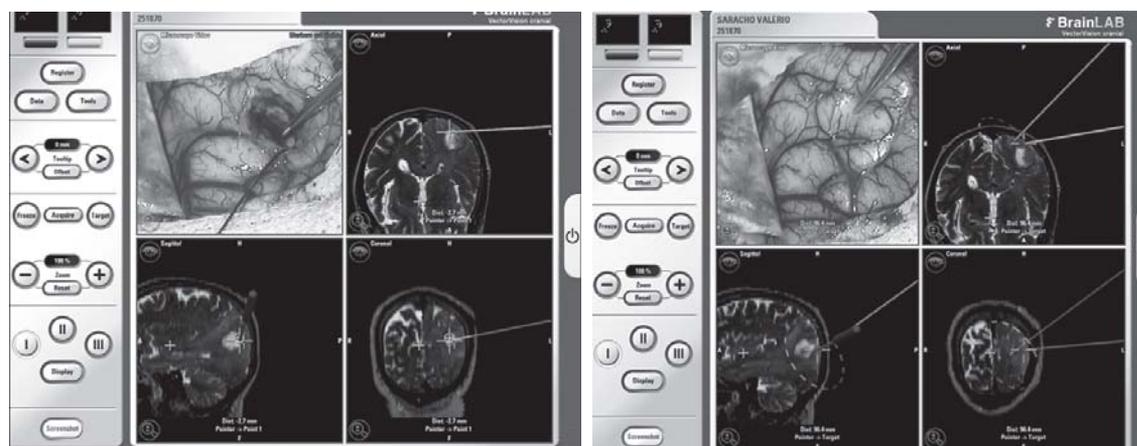


Figura 16. Resección de tumor de bajo grado. Imágenes pre y postoperatorias.

PARTE DE ESTE TRABAJO FUE PRESENTADO EN LAS 8<sup>vas</sup> JORNADAS DE LA ASOCIACIÓN ARGENTINA DE NEUROCIRUGÍA (BUENOS AIRES, 2003) Y EN LA III REUNIÓN DE NEUROCIRUGÍA FUNCIONAL Y ESTEREOTÁCTICA ABCUR (SANTIAGO DE CHILE 2006).

## Bibliografía

- Martínez RM. Precisión y utilidad de la neuronavegación en la cirugía encefálica. Trabajo realizado para optar al Grado de Doctor en Medicina y Cirugía [monografía en Internet]. Barcelona, España: Universidad de Barcelona; 2004 [acceso 02 de agosto de 2007]. Disponible en: [http://www.tesisenred.net/TESIS\\_UB/AVAILABLE/TDX-0112107-114309//RMM\\_Tesis\\_Doctoral.pdf](http://www.tesisenred.net/TESIS_UB/AVAILABLE/TDX-0112107-114309//RMM_Tesis_Doctoral.pdf)
- Watanabe E, Watanabe T, Manaka S, Mayanagi Y, Takakura K. Three-dimensional digitizer (neuronavigator): new equipment for computed tomography-guided stereotaxic surgery. *Surg Neurol* 1987;27(6):543-547.
- Galloway RL, Maciunas RJ, Edwards CA. Interactive image-guided neurosurgery. *IEEE Trans Biomed Eng* 1992;39(12):1226-1231.
- Watanabe E, Mayanagi Y, Kosugi Y, Manaka S, Takakura K. Open surgery assisted by the neuronavigator, a stereotactic, articulated, sensitive arm. *Neurosurgery* 1991;28(6):792-799.
- Roberts DW, Strohbehn JW, Hatch JF, Murray W, Kettenberger H. A frameless stereotaxic integration of computerized tomographic imaging and the operating microscope. *J Neurosurg* 1986;65(4):545-549.
- Barnett GH, Kormos DW, Steiner CP, Weisenberger J. Intraoperative localization using an armless, frameless stereotactic wand. Technical note. *J Neurosurg* 1993;78(3):510-514.
- Kato A, Yoshimine T, Hayakawa T, Tomita Y, Ikeda T, Mitomo M, et al. A frameless, armless navigational system for computer-assisted neurosurgery. Technical note. *J Neurosurg* 1991;74(5):845-849.
- Ryan MJ, Erickson RK, Levin DN, Pelizzari CA, Macdonald RL, Dohrmann GJ. Frameless stereotaxy with real-time tracking of patient head movement and retrospective patient-image registration. *J Neurosurg* 1996;85(2):287-292.
- Buchholz RD, Smith KR. A comparison of sonic digitizers versus light emitting diode-based localization. In: Maciunas RJ, editor. *Interactive Image-Guide Neurosurgery*. Maciunas RJ. Interactive image-guided neurosurgery. Rolling Meadows, IL: American Association of Neurosurgical Surgeons (AANS); 1993. p. 179-200.
- Wagner W, Gaab MR, Schroeder HW, Tschiltschke W. Cranial neuronavigation in neurosurgery: assessment of usefulness in relation to type and site of pathology in 284 patients. *Minim Invasive Neurosurg* 2000;43(3):124-31.
- Kurtsoy A, Menku A, Tucer B, Oktem IS, Akdemir H. Neuronavigation in skull base tumors. *Minim Invasive Neurosurg* 2005;48(1):7-12.
- Spetzger U, Laborde G, Gilsbach JM. Frameless neuronavigation in modern neurosurgery. *Minim Invasive Neurosurg* 1995;38(4):163-6.
- Hopf NJ, Grunert P, Darabi K, Busert C, Bettag M. Frameless neuronavigation applied to endoscopic neurosurgery. *Minim Invasive Neurosurg* 1999;42(4):187-93.
- Lemole GM, Henn JS, Riina HA, Spetzler RF. Cranial application of frameless stereotaxy. *BNI Quarterly* 2001;17(1):16-24.
- Maciunas R. Overview of interactive image-guide neurosurgery: Principles, applications, and new techniques. In: Alexander E III, Maciunas RJ, editors. *Advanced Neurosurgical Navigation*. New York-Stuttgart: Thieme; 1999. p. 15-32.
- Gerber M, Smith KA. Frameless stereotaxy and minimally invasive neurosurgery: Case report. *BNI Quarterly* 2001;17:33-34.
- Alexander E III, Garada B, Schwartz RB, Hill JW, Kooy HM. Fusion of imaging modalities. Single photon emission computed tomography, magnetic resonance imaging, computed tomography and angiography. In: Alexander E III, Maciunas RJ, editors. *Advanced Neurosurgical Navigation*. New York-Stuttgart: Thieme; 1999. p. 125-136.
- Cosgrove GR, Buchbinder BR, Jiang H. Functional magnetic resonance imaging for planning cortical resections. In: Alexander E III, Maciunas RJ, editors. *Advanced Neurosurgical Navigation*. New York-Stuttgart: Thieme; 1999. p. 201-207.
- Wu JS, Zhou LF, Gao GJ, Mao Y, Du GH. Integrating functional magnetic resonance imaging in neuronavigation surgery of brain tumors involving motor cortex [abstract in English]. [Article in Chinese]. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi* 2004;84(8):632-6.
- Unsgaard G, Rygh OM, Selbekk T, Müller TB, Kolstad F, Lindseth F, et al. Intra-operative 3D ultrasound in neurosurgery. *Acta Neurochir (Wien)* 2006;148(3):235-53.
- Haberland N, Ebmeier K, Hliscs R, Grnewald JP, Silbermann J, Steenbeck J, et al. Neuronavigation in surgery of intracranial and spinal tumors. *J Cancer Res Clin Oncol* 2000;126(9):529-41.
- Karabatsou K, Hayhurst C, Buxton N, O'Brien DF, Mallucci CL. Endoscopic management of arachnoid cysts: an advancing technique. *J Neurosurg* 2007;106(6 Suppl):455-62.
- Zhao Y, Yu S, Wang R, Zhao J. Clinical application of a neuronavigation system in transsphenoidal surgery of pituitary macroadenoma. *Neurosurg Rev* 2006;29(4):306-11.
- Jung TY, Jung S, Kim IY, Park SJ, Kang SS, Kim SH, Lim SC. Application of neuronavigation system to brain tumor surgery with clinical experience of 420 cases. *Minim Invasive Neurosurg* 2006;49(4):210-5.
- Willems PW, van der Sprenkel JW, Tulleken CA, Viergever MA, Taphoorn MJ. Neuronavigation and surgery of intracerebral tumours. *J Neurol* 2006;253(9):1123-36.