

Un Estudio del Método y de la Precisión en la Cirugía de Tumores Cerebrales Guiada por Imagen.

Mariana Revilla-Llaca¹, Agustín R. Hernández-Delgado¹, Salvador Manrique-Guzmán², Mauro Loyo-Varela².

¹Escuela de Ingeniería Biomédica, Facultad de Ingeniería, Universidad Anáhuac México Norte.

²Departamento de Neurocirugía, The American British Cowdray Medical Center, IAP, Ciudad de México.

Resumen— Se hace una narración de los aspectos históricos de la localización intracraneana, se describen los principios teóricos de la neuronavegación por imagen, y se presenta una serie de 16 pacientes con tumores cerebrales operados usando neuronavegación guiada por imagen; se comparan la precisión de localización y el grado de resección con 14 pacientes con tumores cerebrales en que no se usó neuronavegación. La neuronavegación guiada por imágenes constituye un notable avance de ingeniería biomédica, con aplicación directa en la interacción con pacientes; en el presente estudio la precisión de localización no mostró diferencia estadísticamente significativa entre los dos grupos (p .191), pero el grado de resección fue mejor en el grupo de operación guiada por imagen (p.017).

Palabras clave—neuronavegación, localización cerebral, cirugía guiada.

I. INTRODUCCIÓN

La localización de estructuras anatómicas o de lesiones intracraneanas, corticales o subcorticales profundas, que no tienen relación constante con estructuras anatómicas externas, con fines de diagnóstico o de tratamiento, ha constituido un problema fascinante, que se ha abordado por diferentes disciplinas científicas y con diferentes métodos a lo largo del tiempo. Probablemente el primer caso de localización exitosa, en ausencia de marcas externas detectables, fue la intervención quirúrgica para reseccionar un tumor cerebral, realizada por el Doctor Rickman Godlee, en Londres, en noviembre de 1884 (1). El paciente, un hombre de 25 años, tenía crisis convulsivas motoras parciales del hemisferio izquierdo, que progresaron a parálisis de las extremidades izquierdas. Basándose en los hallazgos del examen físico neurológico, se hizo el diagnóstico de un tumor cerebral, que se planeó encontrar adyacente al tercio medio de la cisura de Rolando. Empleando algunas marcas externas, el Doctor Godlee pudo, a través de una pequeña craneotomía, encontrar el tumor inmediatamente después de abrir la duramadre, en el sitio preciso de la craneotomía, y reseccionarlo con éxito. A pesar de que el paciente terminó falleciendo por una complicación, el caso fue muy comentado porque demostró la posibilidad de localizar adecuadamente una lesión intracraneana que no había producido marcas externas, a través del conocimiento de neuroanatomía y neurofisiología de ese tiempo (2).

El siguiente paso importante, y los subsecuentes, dejaron de pertenecer al campo puro de las ciencias médicas, e iniciaron el profundo impacto de las matemáticas, la física y la ingeniería; la posibilidad de localizar lesiones de este tipo se expandió con el descubrimiento de los rayos X, en 1895, por Wilhelm Roentgen, y específicamente con el desarrollo del neumoencefalograma, por Dandy en 1918; este método suplió la carencia de referencias internas de los rayos X simples, con la introducción de aire en el sistema ventricular y su visualización directa en las radiografías (2). Más tarde se introdujo en práctica clínica la tomografía axial computarizada, y posteriormente la resonancia magnética, como métodos avanzados de adquisición de imágenes. En neurociencias, su uso permite obtener imágenes secuenciales bidimensionales del encéfalo con el cráneo intacto (3).

Para fines diagnósticos, el avance ha sido inconmensurable; para fines terapéuticos, el cirujano frecuentemente se encuentra en la tarea de intentar hacer una reconstrucción mental, imaginaria, en tres dimensiones, del contenido del cráneo, a partir de las imágenes bidimensionales obtenidas en Tomografía y resonancia magnética.

Intentando solucionar esta limitación, Spiegel desarrolló en la década de 1940, el estereocéfalo, un marco de coordenadas adaptado para fijarse al cráneo del paciente, con intención de localizar “blancos”, u “objetivos” intracraneanos, e introducir sondas, o electrodos (4).

El invento evolucionó a varios modelos de marcos y sistemas de instrumentación de esterotaxia, que combinaron el LASER, el microscopio quirúrgico, y la simulación computarizada, para realizar biopsias, braquiterapia, aspiración de colecciones líquidas, lesiones profundas, y resecciones de tumores (5).

El siguiente paso en ingeniería biomédica de navegación cerebral, es el neuronavegador, introducido a la práctica clínica por Roberts en 1986 (6).

Los sistemas de neuronavegación actuales tienden constantemente a mejorar en cuanto a facilidad de uso, y precisión en la localización, esencialmente están basados en usar imágenes cerebrales como mapas, instrumentos de seguimiento o localización, y una función matemática que asocia la posición real de los instrumentos con la posición en la imagen de registro. El registro es el elemento clave en la cirugía guiada por imágenes; se define como la determinación de una transformación geométrica que relaciona las imágenes cerebrales con el cráneo y cerebro

del paciente (4). En los sistemas de neuronavegación actuales, se aplica una transformación rígida de las imágenes cerebrales al cráneo a través de movimientos de traslación y rotación. El registro puede llevarse a cabo acoplando parejas de puntos en espejo, o alineando superficies. El registro de parejas de puntos se basa en puntos correspondientes de la cabeza del paciente y en el volumen de la imagen que el sistema procesa y relaciona para minimizar su distancia.

Los sistemas de navegación usualmente proporcionan la media de la raíz cuadrada del error como un estimado de la precisión del sistema. Sin embargo, es bien conocido que éste error de registro no siempre se correlaciona adecuadamente con el error en el paciente, pero es un indicador del funcionamiento adecuado del navegador (7).

Los puntos que se emplean han variado en corto tiempo; los marcadores más exactos son tornillos colocados en el hueso, pero su uso se ha abandonado por su invasividad (8); los puntos de más amplio uso, son fiduciales radiopacos, o visibles para resonancia magnética, auto adheribles (9), que son fáciles de usar, pero requieren de personal entrenado, y tiempo para ser colocados, y ocasionan molestias al paciente. Estos fiduciales pueden moverse, y la exactitud del registro se correlaciona en forma inversa al tiempo que pasa entre la adquisición de la imagen y la intervención quirúrgica (10). El registro con puntos pareados de marcas anatómicas tiene las ventajas de reducir el personal y el tiempo necesario, y las desventajas de la necesidad de un operador con conocimiento adecuado de anatomía y de que la precisión es menor que con los fiduciales adhesivos. Finalmente, el registro basado en superficie, que hace coincidir puntos adquiridos de la anatomía del paciente con una superficie de la imagen volumétrica quita la necesidad de marcadores en la piel, es un método rápido, intuitivo y fácil de usar, no requiere la identificación de puntos anatómicos específicos (10).

El principio primario de los sistemas de navegación es la tecnología de localización. El instrumento de localización determina la posición espacial del instrumento quirúrgico rastreado en la relación paciente-imagen, a través de un rastreador que el instrumento quirúrgico tiene adherido. Existen actualmente sistemas ópticos y electromagnéticos (11). Los sistemas ópticos utilizan una cámara digital para localizar los rastreadores en el espacio. La cámara detecta haces infrarrojos de diodos emisores de luz (LEDs) en los dispositivos de rastreo, o haces infrarrojos reflejados de esferas colocadas en el paciente y en los instrumentos quirúrgicos. Como el sistema conoce la geometría del dispositivo rastreador, la posición del instrumento rastreado en relación a la anatomía del paciente puede ser calculada empleando un método de triangulación. El sistema óptico requiere una línea ininterrumpida de visión entre la cámara y el rastreador: por lo menos tres haces infrarrojos deben ser visibles para el sistema para una localización exitosa. Esto significa una desventaja en campos quirúrgicos saturados y en microneurocirugía (12). Los sistemas ópticos están basados en una configuración geométrica rígida entre los

puntos de rastreo y la punta del instrumento quirúrgico; esta condición los hace inoperantes para instrumentos flexibles, catéteres o agujas.

La tecnología electromagnética de rastreo está basada en un campo magnético emitido por un generador en forma de coordenadas, y coils en los instrumentos de rastreo que son atraídos al campo electromagnético. La corriente inducida en los coils se traduce en detección de posición; además del generador del campo magnético, el sistema consiste de una referencia de rastreo fija a la cabeza del paciente, y un localizador de rastreo en los instrumentos quirúrgicos. Se utilizan múltiples coils en el localizador que permiten determinar lugar, trayectoria y rotación del instrumento quirúrgico. La posibilidad de rastreo sin necesidad de línea directa de visión es la ventaja más grande del Sistema electromagnético, así como la posibilidad de navegar instrumentos flexibles pequeños, como aspiradores, catéteres o endoscopios (13).

La cirugía de tumores cerebrales guiada por imagen se lleva a cabo actualmente (2010 a la fecha) en forma similar a nivel mundial más comúnmente con marcadores fiduciales, con rastreo con tecnología óptica, y con navegación intermitente basada en un señalador: si el cirujano desea navegar o localizar, el neurocirujano interrumpe la disección, e intercambia el instrumento de disección por un señalador de rastreo, que se introduce al sitio quirúrgico de interés y la punta se correlaciona con la imagen de la pantalla del navegador, que corresponde a un estudio preoperatorio; es necesario permitir una línea de visión entre el instrumento rastreador y la cámara, para lo cual frecuentemente se requiere retirar el microscopio quirúrgico (14).

Por tanto, a pesar de lo avanzado del método, aun plantea problemas y necesidades por resolver en la aplicación práctica de tecnología; la posibilidad de navegación continua, y de instrumentos familiares al cirujano, que no requieren adherir o incorporar dispositivos grandes o estorbosos, y la posibilidad de navegación en tiempo real.

La pregunta de si ésta tecnología contribuye a una localización más precisa, o a resecciones más completas en la práctica clínica, o de si únicamente es un método que proporciona seguridad al cirujano, aun no se ha contestado. Este trabajo analiza el empleo de un neuronavegador de sistema óptico de la compañía norteamericana Medtronic (S7 StealthStation AxiEM; Medtronic, Louisville, Colorado) en la intervención quirúrgica de 16 pacientes con tumores cerebrales, y compara los resultados de precisión de localización y de grado de resección con los de 14 pacientes con tumores cerebrales en que no se usó neuronavegación.

II. METODOLOGÍA

Se estudiaron en forma retrospectiva los expedientes clínicos, quirúrgicos, y radiológicos de 16 pacientes con tumores cerebrales operados en los años 2012-2015 con el Neuronavegador Medtronic StealthStation (S7 StealthStation AxiEM; Medtronic, Louisville, Colorado) y de 14 pacientes con tumores cerebrales operados sin el uso del Neuronavegador en los años 2008-2011, en el Centro Médico ABC de la Ciudad de México. Se establecieron como puntos de desenlace de interés para este estudio: I. La precisión de localización, definida como la relación entre el centro de la craneotomía y el centro del tumor, medidas en la tomografía computada postoperatoria inmediata; se asignó valor de 1-excelente, si coincidieron los centros; de 2-buena, si difirieron entre 0.5 y 2 centímetros; de 3-regular si difirieron entre 2.1 y 3.5 centímetros; y de 4-mala si difirieron entre 3.6 y 4.5 centímetros. II. El grado de resección de la tumoración, medida en la tomografía computada postoperatoria inmediata, definida como 1 total, 2 subtotal mayor a 50%, 3 subtotal menor a 50%. El análisis de los datos se llevó a cabo empleando la prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes, dado que la población estudiada no mostró distribución normal (prueba de Kolmogorov-Smirnov con $p=0.000$, prueba de Shapiro-Wilk con $p=0.000$) con el programa estadístico SPSS (IBM SPSS Statistics, V 21).

Los datos epidemiológicos, quirúrgicos, de extirpe tumoral, y de localización anatómica de los pacientes estudiados fueron evaluados y comparados entre grupos, no existen diferencias estadísticamente significativas en edad, sexo, tipo histológico y localización de tumor entre los dos grupos estudiados.

La revisión de los expedientes quirúrgicos mostró uniformidad en la descripción de la metodología del uso del neuronavegador. Los datos de registro se muestran en la tabla 1.

En el grupo de 16 pacientes en que se usó el neuronavegador, en 12 se consiguió resección completa, en 3 subtotal mayor a 50%, y en 1 subtotal menor a 50%; mientras que en el grupo de 14 pacientes en que no se usó el neuronavegador, en 4 se consiguió resección completa, en 7 subtotal mayor a 50%, y en 3 subtotal menor a 50%. Empleando la prueba U de Mann Whitney para muestras independientes en el programa IBM SPSS V21, hemos encontrado una diferencia estadísticamente significativa ($p=0.014$).

La precisión de localización del tumor, en el grupo de 16 pacientes en que se usó el neuronavegador, fue excelente en 15 pacientes, y buena en 1. En el grupo en que no se usó el neuronavegador, la precisión de localización fue excelente en 11, buena en 2, regular en 1. Empleando la prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes en el programa IBM SPSS V21, hemos encontrado una diferencia estadísticamente no significativa ($p=0.218$).

III. RESULTADOS

Tabla 1. RESULTADOS DE PRECISIÓN EN PACIENTES OPERADOS^a

Paciente	<i>Técnica de Navegación</i>			<i>Error Registrado^b</i>		
	Tecnología de Rastreo	Registro	Dispositivo de Rastreo	ECM	Min	Max
1	Óptico	Fiducial	Puntero	0.2	0.2	0.3
2	Óptico	Fiducial	Puntero	0.4	0.2	0.5
3	Óptico	Fiducial	Puntero	0.6	0.4	0.8
4	Óptico	Fiducial	Puntero	...	...	...
5	Óptico	Fiducial	Puntero	0.4	0.2	0.5
6	Óptico	Fiducial	Puntero	0.4	0.2	0.5
7	Óptico	Fiducial	Puntero	0.2	0.2	0.3
8	Óptico	Fiducial	Puntero	0.7	0.4	1
9	Óptico	S.C. ^c	Puntero	...	...	...
10	Óptico	S.C.	Puntero	0.4	0.2	0.5
11	Óptico	S.C.	Puntero	0.2	0.2	0.3
12	Óptico	S.C.	Puntero	...	...	...
13	Óptico	S.C.	Puntero	0.4	0.2	0.5
14	Óptico	S.C.	Puntero	0.2	0.2	0.3
15	Óptico	S.C.	Puntero	0.2	0.2	0.3
16	Óptico	S.C.	Puntero	...	...	...

^a Max, máximo; Min, mínimo; ECM, error cuadrático medio.

^b ECM calculado por el sistema de navegación después del registro fiducial único.

^c Por S.C. entiéndase Superficie Combinada

Referencias Bibliográficas

IV. DISCUSIÓN

Durante el curso del presente estudio, realizado a 30 pacientes con tumores cerebrales, 16 de los cuales fueron operados con el último adelanto de la Ingeniería Biomédica: el neuronavegador, fue posible observar que este novedoso aparato es significativamente eficaz en su uso para la resección de tumores cerebrales, ya con el uso de este aparato se logró la resección completa de 75% de los tumores mientras que sin el uso del neuronavegador se logró la resección completa de 28.5% de los tumores. Por otro lado, se encontró que en la práctica clínica, la mejora en la precisión de localización usando el neuronavegador o versus otros mecanismos de localización cerebral no es realmente significativa.

El neuronavegador proporciona seguridad al cirujano ya que le otorga la posibilidad de establecer la localización de la lesión de una manera más sencilla a los procedimientos precursores de este aparato. Además, el neuronavegador permite llevar a cabo procedimientos menos invasivos, que como se ha comprobado, llevan a mejores resultados.

V. CONCLUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos durante el presente estudio, es posible concluir que el neuronavegador no mejora significativamente la navegación cerebral, ya que los resultados obtenidos con el uso del aparato mencionado y sin el uso de éste no presentan una diferencia significativa. Por otro lado, es posible concluir que el uso del navegador lleva a mejores resultados en la resección de tumores cerebrales, haciendo este procedimiento menos invasivo, menos riesgoso y significativamente más eficaz.

El neuronavegador es el resultado de una larga trayectoria en el estudio de la imagenología clínica y la localización cerebral, que ya su desarrollo no forma parte solamente de las ciencias médicas, si no de la física, las matemáticas y la ingeniería. La comprensión y el estudio de la relación anatómica y fisiológica del cerebro con las funciones matemáticas que lo describen y localizan va a permitir la creación de mejores aparatos que faciliten el trabajo de los cirujanos y permitan mejores resultados para los pacientes. Además, permitirán una mejor comprensión y acercamiento a los misterios del cerebro humano.

1. Wilkins RH. *Neurosurgical classics*: Thieme; 1992.
2. Kerr PB, Caputy AJ, Horwitz NH. A history of cerebral localization. *Neurosurg Focus*. 2005;18(4):e1.
3. Raza SM, Papadimitriou K, Gandhi D, Radvany M, Olivi A, Huang J. Intra-arterial intraoperative computed tomography angiography guided navigation: a new technique for localization of vascular pathology. *Neurosurgery*. 2012;71(2 Suppl Operative):ons240-52; discussion ons52.
4. Alexander E, Maciunas RJ. *Advanced neurosurgical navigation*: Thieme; 1999.
5. Moseley JI, Giannotta SL, Renaudin JW. A simple, inexpensive technique for accurate mass localization by computerized tomography: technical note. *Journal of neurosurgery*. 1980;52(5):733-5.
6. Roberts DW, Strohbehn JW, Hatch JF, Murray W, Kettenberger H. A frameless stereotaxic integration of computerized tomographic imaging and the operating microscope. *Journal of neurosurgery*. 1986;65(4):545-9.
7. Steinmeier R, Rachinger J, Kaus M, Ganslandt O, Huk W, Fahlbusch R. Factors influencing the application accuracy of neuronavigation systems. *Stereotactic and functional neurosurgery*. 2000;75(4):188-202.
8. Maurer CR, Jr., Fitzpatrick JM, Wang MY, Galloway RL, Jr., Maciunas RJ, Allen GS. Registration of head volume images using implantable fiducial markers. *IEEE transactions on medical imaging*. 1997;16(4):447-62.
9. Pfisterer WK, Papadopoulos S, Drumm DA, Smith K, Preul MC. Fiducial versus nonfiducial neuronavigation registration assessment and considerations of accuracy. *Neurosurgery*. 2008;62(3 Suppl 1):201-7; discussion 7-8.
10. Wolfsberger S, Rossler K, Regatschnig R, Ungersbock K. Anatomical landmarks for image registration in frameless stereotactic neuronavigation. *Neurosurgical review*. 2002;25(1-2):68-72.
11. Watanabe E, Watanabe T, Manaka S, Mayanagi Y, Takakura K. Three-dimensional digitizer (neuronavigator): new equipment for computed tomography-guided stereotaxic surgery. *Surgical neurology*. 1987;27(6):543-7.
12. Glossop ND. Advantages of optical compared with electromagnetic tracking. *The Journal of bone and joint surgery American volume*. 2009;91 Suppl 1:23-8.
13. Kral F, Puschban EJ, Riechelmann H, Pedross F, Freysinger W. Optical and electromagnetic tracking for navigated surgery of the sinuses and frontal skull base. *Rhinology*. 2011;49(3):364-8.
14. Mert A, Gan LS, Knosp E, Sutherland GR, Wolfsberger S. Advanced cranial navigation. *Neurosurgery*. 2013;72 Suppl 1:43-53.