

Fundamentos de la cirugía estereotáctica: pasado, presente y futuro



DR. JUAN C. BENEDETTI

*Neurocirujano.
Subespecialista en Cirugía Estereotáctica
Funcional y Oncológica
Hospital Neurológico de la Liga Colombiana
contra la Epilepsia (HN-LCE).
Cartagena de Indias, Colombia.
jucabimoro@yahoo.com*

Con el inicio de la práctica neuroquirúrgica se planteó la gran dificultad del abordaje de las estructuras profundas del cerebro. El acceso, por ejemplo a los ganglios de la base, envuelve un riesgo inevitable e inaceptable de daño de áreas elocuentes debajo de la superficie cerebral o aquellas adyacentes a estos ganglios. Las técnicas de cirugía abierta convencional son esencialmente métodos inapropiados para la cirugía de estructuras profundas del cerebro, a pesar del gran avance de las técnicas microquirúrgicas. La cirugía estereotáctica nace como una solución a estas limitantes.

El término "stereotaxy" deriva de dos raíces griegas: "stereos" que significa sólido (tridimensional) y "takse" posicionamiento. Durante mucho tiempo hubo debates si el adjetivo correcto era estereotáctica o estereotáctica. El primero es etimológicamente correcto; sin embargo, el segundo tiene mucha relación con el procedimiento quirúrgico ("tactic" significa tocar). En 1973 se cambió el nombre de la sociedad dedicada a esta práctica, "Sociedad de Estereoencefalografía a "Sociedad Mundial de Cirugía Estereotáctica y Funcional".

La historia de la cirugía estereotáctica empieza con el uso de los principios cartesianos de Horsley y Clark, quienes en 1908 diseñaron el primer aparato estereotáctico que lo usaron para investigar la fisiología cerebelar en monos⁽¹⁾. Posteriormente, la primera cirugía estereotáctica funcional fue realizada por Spiegel y Wycis en 1946 en un paciente con Corea de Huntington al cual lo trataron inyectándole alcohol en el globo pálido y el tálamo medial⁽²⁾. (Figura 1)

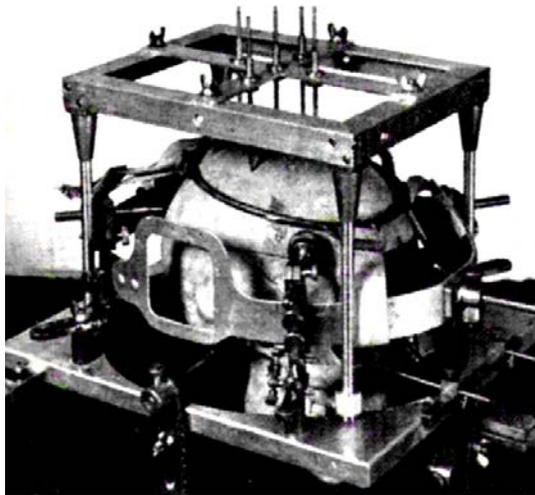


Figura 1. Estereoencefalótomo, modelo II.
(Reproducido de Spiegel and Wycis.)

Durante la década de los 50s fueron diseñados por lo menos 40 aparatos estereotácticos.

El sistema de Spiegel-Wycis era de tipo traslacional; la posición del electrodo era cambiada deslizando el portador de instrumentos en forma ántero-posterior y látero-lateral a lo largo de la base posicionando las tres coordenadas separadamente. Los sistemas de Leksell, Riechert y Todd-Wells eran arco-centrado; esto es, que las tres coordenadas indican el centro de un arco semicircular a lo largo del cual se mueve un portador de electrodo (instrumentos), siempre apuntando el electrodo al isocentro, independientemente a la trayectoria. (Figuras 2,3,4 y 5) Como siempre el blanco estereotáctico se encuentra en el centro del arco, la trayectoria a través de cualquier ángulo lleva al instrumento al blanco escogido. Un cuarto sistema fue introducido en 1980, el BRW (Brown-Roberts-Wells) basado en un sistema de arcos interpuestos.

Todos estos equipos de estereotaxia proveen un sistema de coordenadas para guiar o "navegar" con alta precisión hasta un punto o región en el espacio estereotáctico. Estos sistemas pueden consistir en un "marco" fijo a la cabeza (sistemas con marco), o un sistema remoto basado en la colocación de fiducias al cráneo para luego interactuar con imágenes preconcebidas (TAC/RM) mediante sistemas de cámaras con rayos infrarrojos o sistemas sónicos (sistemas sin marco o neuronavegadores). Los sistemas con marco van unidos al cráneo, generalmente, mediante cuatro puntos de apoyo (Pines).

Posteriormente se articulan al marco o anillo un sistema de fiducias (Placas de localización), las cuales crean un espacio estereotáctico tridimensional, permitiendo hacer cálculos en 3 ejes (X,Y,Z), para determinar la precisa localización del punto o blanco estereotáctico escogido guiado por imágenes como la

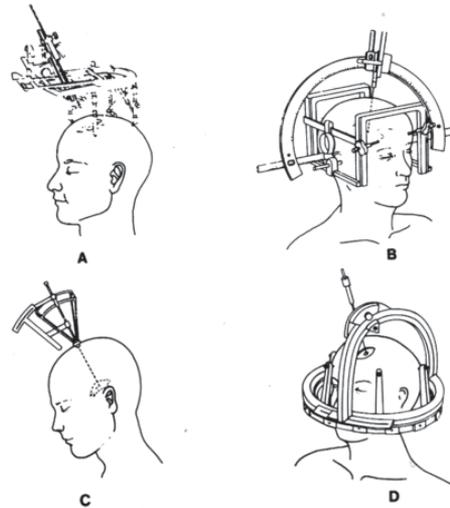


Figura 2. Diferentes sistemas estereotácticos basados en el principio de "Arco-centrado".

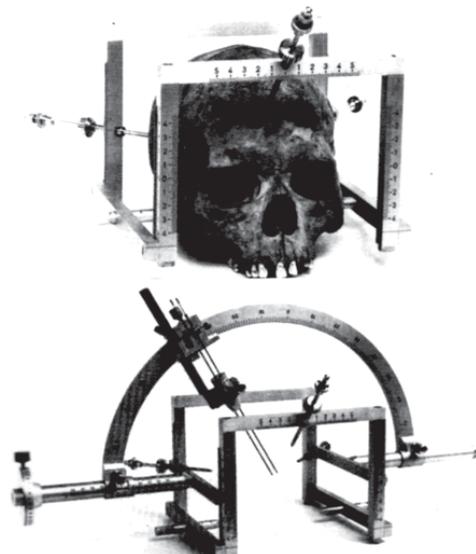


Figura 3. Sistema original de Leksell.

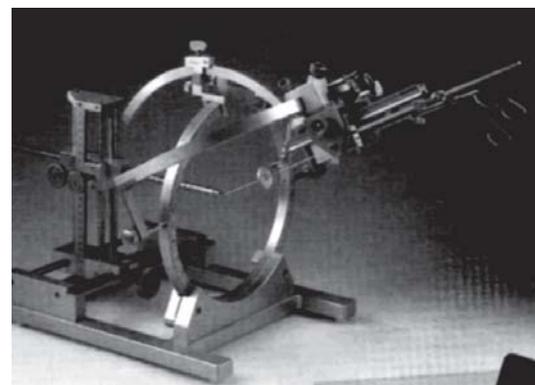


Figura 4. Sistema de Riechert -Mudinger

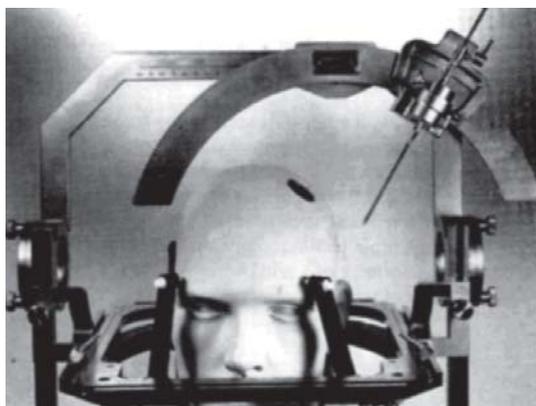


Figura 5. Sistema CRW

TAC, RM o una fusión de las mismas. En los primeros sistemas se hacían cálculos manuales por medio de alineaciones geométricas y matriciales guiados por Rx y/o ventriculografía. Con el advenimiento de la TAC (80s) y posteriormente la RM, todos los sistemas estereotácticos cuentan con programas computarizados capaces de interactuar con la TAC, RM o una fusión de las mismas⁽⁴⁾. (Figuras 6, 7)

Hoy en día los nuevos sistemas han permitido dejar atrás los sistemas binarios y entrar en el concepto tridimensional de volumen estereotáctico. Se han unido múltiples tipos de información como las imágenes (TAC, RM, RMf, ECO, PET), atlas estereotácticos y de neuroanatomía hasta el punto que los "neuronavegadores" actuales son capaces de superponer imágenes virtuales sobre las manos reales de los cirujanos, permitiendo abordajes mas seguros a zonas elocuentes o profundas del cerebro.⁽⁵⁾ (Figuras 8, 9 10 y 11)

Biopsia estereotáctica

La cirugía estereotáctica se ha convertido en una subespecialidad indispensable en los servicios de neurocirugía, siendo los procedimientos estereotácticos y en especial la biopsia estereotáctica seriada (BES) una herramienta diagnóstica y en algunas oportunidades terapéutica esencial en la práctica neuroquirúrgica actual. La BES siempre debe contemplarse como procedimiento de elección ante la evidencia de lesiones cerebrales únicas o múltiples, con mas de una posibilidad diagnóstica, sobre todo aquellas de difícil acceso por técnicas neuroquirúrgicas convencionales, ya sea por su ubicación en áreas elocuentes o por su profundidad.

Los pilares para lograr las una mayor sensibilidad diagnóstica y mínima morbimortalidad son: Un adecuado planeamiento estereotáctico (selección del blanco más representativo, trayectoria más corta, atravesar un solo plano pial, evitar estructuras vasculares y evitar áreas elocuentes) y la selección adecuada del paciente. (Figuras 12 y 13)

En nuestra serie tenemos una sensibilidad diagnóstica (SD) del 98.3% con una morbilidad del 6,6% sin ningu-

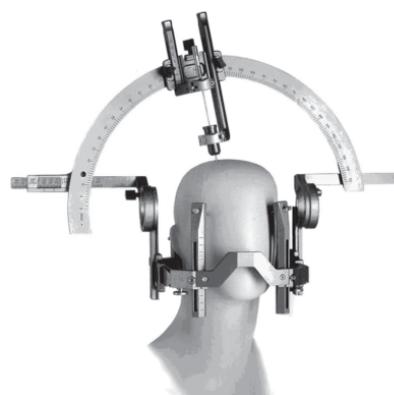


Figura 6. Sistema actual de Leksell



Figura 7. Sistema ZD

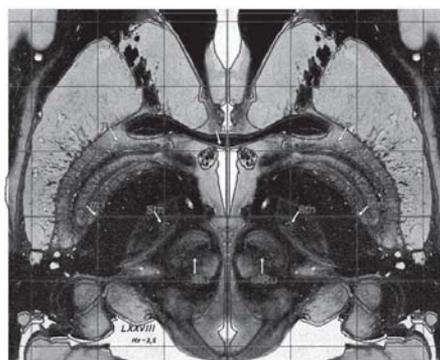


Figura 8. Atlas estereotáctico anatómico digitalizado.

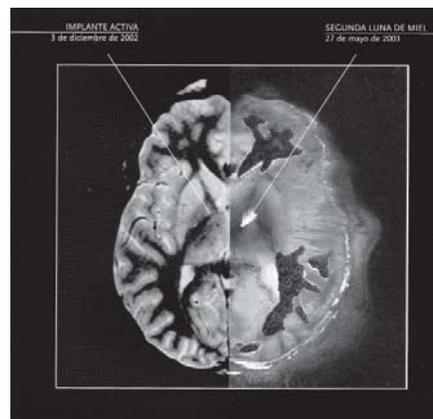


Figura 9. Sistema de fusión de imágenes.

na mortalidad ⁽⁶⁾. Munding en su serie de 1293 pacientes sometidos a BES nos muestra una SD 99% con una morbilidad del 4% y una mortalidad del 0.6%. ⁽⁷⁾ Lunsford et al en su serie de 102 BES obtuvo una SD de 96%, una morbilidad del 6% y ninguna mortalidad ⁽⁸⁾.

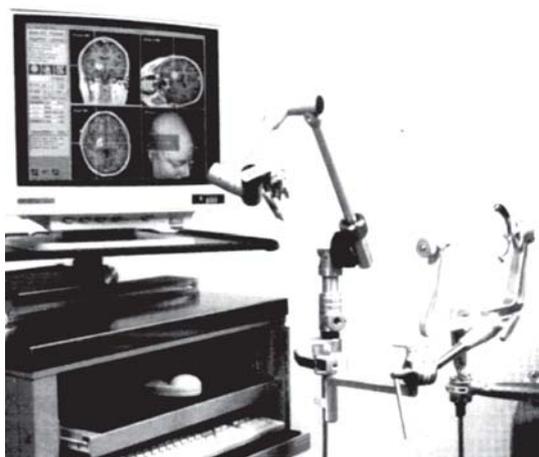


Figura 10. Sistema de neuronavegación

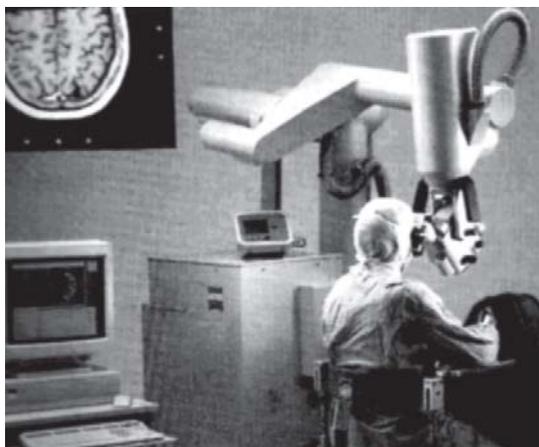


Figura 11. Sistema de neuronavegación-microscopio MKM

Biopsia estereotáctica en lesiones tumorales

La piedra angular del manejo racional de las neoplasias cerebrales es obtener tejido para diagnóstico histológico de forma precisa. La biopsia estereotáctica guiada imagenologicamente ha sido una alternativa relativamente segura y efectiva tanto para craneotomía como para técnicas con aguja ⁽⁹⁾. La BES debe siempre ser tenida en cuenta cuando el diagnóstico definitivo del tumor no se ha logrado posterior a una resección tumoral. La BES ha demostrado una muy bajo porcentaje de complicaciones y una alta positividad diagnóstica, esta raramente indicado irradiar de

manera empírica una lesión tumoral sin adecuado diagnóstico histopatológico.

El diagnóstico tisular en gliomas y otros tumores intraaxiales puede ser obtenido por biopsia estereotáctica, frecuentemente con la ventaja de una muestra tisular más precisa y mucho menos trauma quirúrgico en comparación con las técnicas convencionales a mano libre. El acercamiento estereotático puede ser usado tanto para reducir la presión intracraneal producido por quistes tumorales o por hidrocefalia obstructiva. En función de acortar el tiempo operatorio, el tiempo de recuperación y las complicaciones quirúrgicas relacionadas, la biopsia estereotáctica puede mejorar la evolución a corto plazo de los pacientes con gliomas. ^(9,11)

Las lesiones neoplásicas que comprometen el tallo cerebral constituyen un reto para las técnicas estereotáticas y aunque baja la probabilidad de morbilidad, debe ser tenida en cuenta. En contraposición, el diagnóstico erróneo de estas lesiones por imágenes se encuentra entre un 10-20%, ⁽¹⁰⁾ debido a la heterogeneidad patológica en estas áreas críticas, no justificándose en la actualidad la iniciación de radioterapia empírica sin un adecuado diagnóstico histopatológico.

En nuestra serie de 170 lesiones biopsadas estereotáticamente en 48 casos (80%) pertenecieron a patología tumoral, con una morbilidad relativa del 6,25% (3 Casos) por tratarse de patologías ubicadas en el tallo cerebral (2 de 8 procedimientos) y tálamo (1 de 4 procedimientos).

BES en pacientes con sida

En este tipo de pacientes se debe establecer tanto el riesgo patológico del paciente como del equipo neuroquirúrgico, lo cual incluye las personas del quirófano como las del departamento de patología. Esta evaluación debe medir las posibilidades de un diagnóstico exitoso que pueda modificar el tratamiento y ejerza beneficios reales para el paciente. Una indicación relativa deben ser los casos en donde se sospeche PML (Leucoencefalopatía Multifocal Progresiva) ⁽¹²⁾.

Existen 3 indicaciones principales para biopsia estereotáctica de lesiones cerebrales: 1-Una lesión sólida solitaria vista en IRM acompañada de síntomas neurológicos, ya que hay mayores posibilidades de que tal lesión se deba a un linfoma, mas que a un Absceso por Toxoplasma. 2-Lesiones sólidas múltiples en IRM o TAC que no respondan a terapia antitoxoplasmosis de 2 semanas. 3-Lesiones múltiples en TAC de un paciente que esta neurologicamente muy inestable como para arriesgar tratamiento antibiótico de 2 semanas ⁽¹²⁾.

En un estudio realizado por Nicolato y cols., ⁽¹³⁾ en pacientes con SIDA, el protocolo de tratamiento se modifico en 85.2% de casos (en 23 de 27 pacientes), y el régimen antitoxoplasmosis empírico se

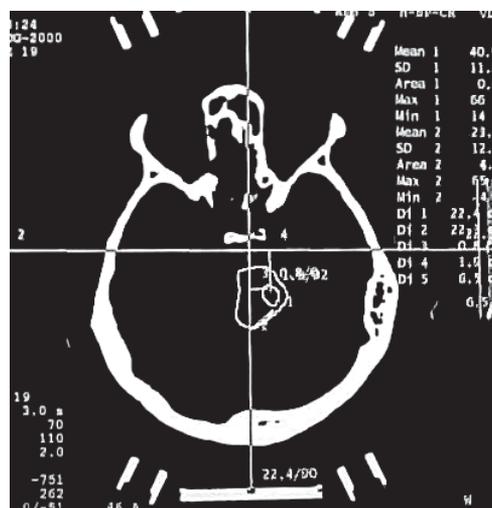


Figura 12. Planeamiento estereotáctico

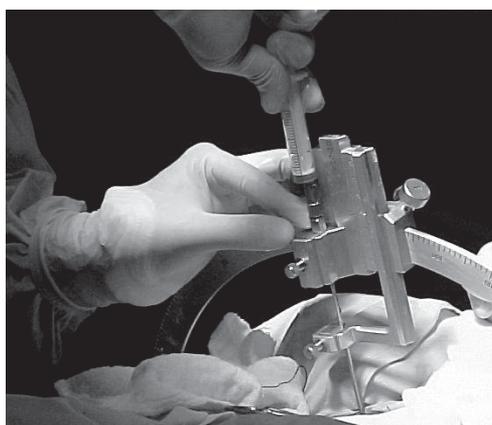


Figura 13. Biopsia estereotáctica espirativa.

cambio o suspendió en 81% de pacientes (17/21 casos) posterior a la BES⁽¹³⁾. (Figuras 12 y 13)

BES y demencias

La utilidad BES en las demencias ha sido ilustrada en el trabajo realizado Waltregny y cols.,⁽¹⁴⁾ donde un 33% de 28 pacientes diagnosticados con demencia les fue cambiado el diagnóstico, los cuales incluían: Alzheimer, Pick, Creutzfeld-Jakob y Kufs. BES es recomendada para la epidemiología y eficacia de tratamiento de los síndromes demenciales.

Craneotomía y resección volumétrica guiada

El tratamiento quirúrgico actual de las lesiones cerebrales y sobre todo aquellas ubicadas en áreas elocuentes o de difícil acceso implica la utilización de métodos estereotácticos y neurofisiológicos multimodales. El refinamiento en las técnicas de cirugía estereotáctica guiada y particularmente, en la cirugía guiada por imágenes ha incrementado la facilidad, seguridad y precisión en el tratamiento

microquirúrgico de las lesiones no visibles en la superficie cerebral^(15,16,17).

El poder de la cirugía estereotáctica con marco fue dada a conocer por Kelly y cols.⁽¹⁸⁾ a través del concepto de la resección volumétrica. Esta técnica asistida mediante computador usada en el preoperatorio mostraba todo el volumen tumoral y otras estructuras seleccionadas en el espacio estereotáctico, pudiendo así tener una reconstrucción computarizada a lo largo del trayecto quirúrgico preseleccionado, proporcionando una excelente guía con respecto a puntos y volúmenes en el espacio estereotáctico. Con el advenimiento de la TAC y RM aplicadas al uso de la cirugía estereotáctica con marco a través de software implementaron la seguridad y la cirugía mínimamente invasiva de los tumores cerebrales dejando el mito a un lado de "solo grandes craneotomías logran buenas exposiciones de la patología tumoral subyacente"⁽⁹⁾. (Figuras 14 a 18) Los sistemas de neuronavegación son una lógica extensión de las técnicas en cirugía estereotáctica para resecciones volumétricas. La principal ventaja de estos sistemas reside en la habilidad que tiene el cirujano de localizar y visualizar instantáneamente estructuras en forma multiplanar en imágenes preconcebidas en resonancia magnética, tomografía y/o fusión de las mismas. Estos sistemas de cirugía en "tiempo real" en adición a la trayectoria y localización del blanco estereotáctico permiten la identificación de estructuras tales como vasos y anatomía cortical que podrían estar ocultas debajo de la superficie. Algunas de las variables que pueden afectar la apreciación intraoperatoria de la necesidad de mayor resección de volumen del tumor y/o la localización subcortical del mismo pueden ser: el excesivo drenaje de líquido cefalorraquídeo, hiperventilación o diuréticos lo que produciría un desplazamiento del parenquima cerebral.

Actualmente existen otras técnicas mínimamente invasivas, como los sistemas de neuronavegación, que comparte ventajas con la craneotomía estereotáctica con la ventaja adicional de no utilizar marco estereotáctico y la visualización interactiva del instrumento colocado en el cráneo del paciente. Mediante software y gráficos computarizados tridimensionales es posible definir con gran precisión la trayectoria hacia la lesión y los márgenes de la misma con relación a la estructuras vecinas. (Figura 19)

Los diferentes software de fusión de imágenes nos permiten integrar áreas anatómicas con imágenes funcionales (RMf, magneto-EEG, PET, SPET, Tractografía) (Figuras 20, 21 y 22) asegurando con gran precisión la no lesión y/o modulación de estas áreas elocuentes. Disponemos hoy en día de sistemas basados en rayos infrarrojos y sistemas sónicos. Estos sistemas cuentan con: 1-Estación de trabajo: Basada en un sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z). A cada plano de coordenadas, se le prefija un punto cero alrededor del cual los planos son rotados juntos y con escala de iguales dimensiones.

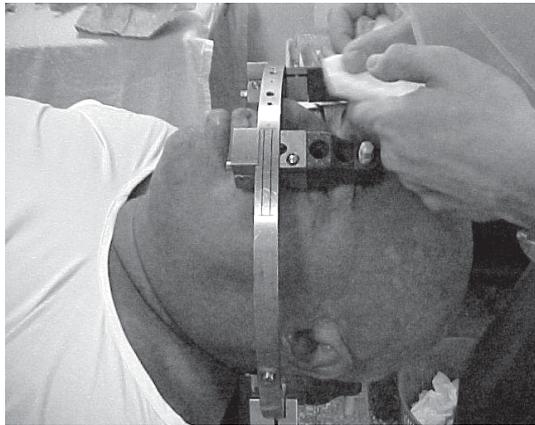


Figura 14. Colocación de marco estereotáctico.

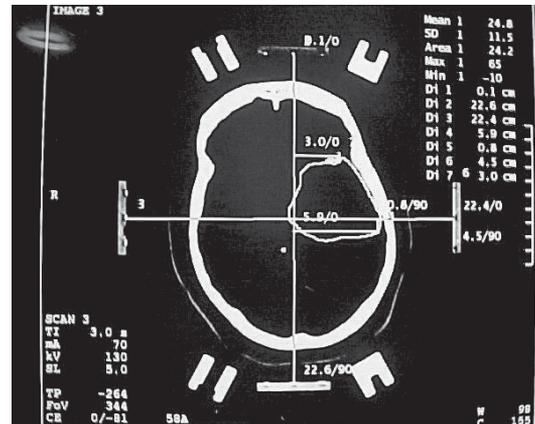


Figura 15. Programación estereotáctica volumétrica en TAC.

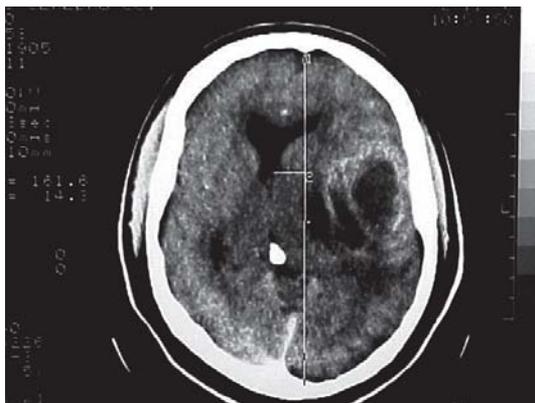


Figura 16. TAC preoperatoria.

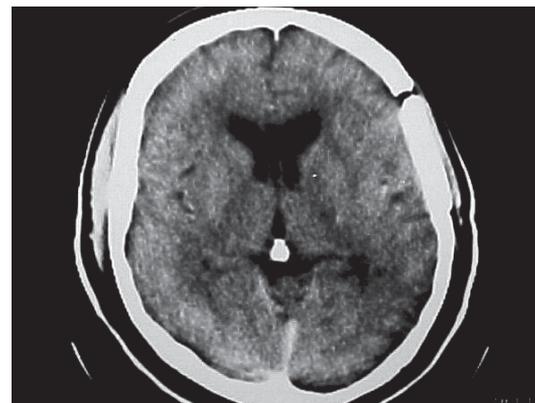


Figura 17. TAC posoperatoria.

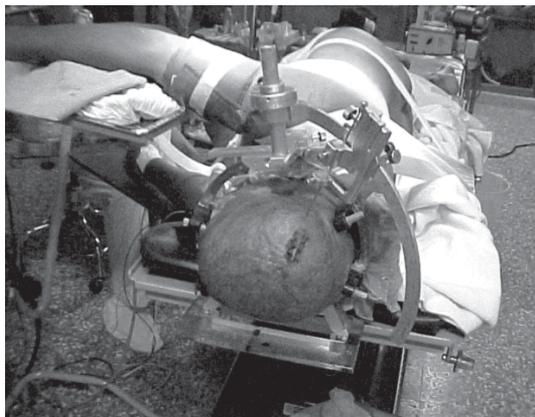


Figura 18. Reducida incisión abtualmente utilizada mediante esta técnica.

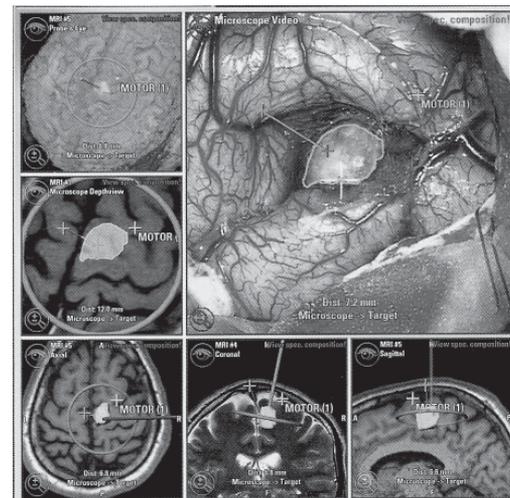


Figura 19. Neuronavegación intraoperatoria. Definición de trayectoria y límites del tumor.

2-Cámara infrarroja (genera y captura radiación infrarroja). 3-Marco de referencia dinámico, provisto de LEDs (Light Emmitting Diodes), los cuales emiten radiación infrarroja en sincronía con la cámara y de esta forma la estación de trabajo, calcula, mediante un algoritmo, la posición del instrumento en el espacio y lo proyecta en el monitor sobre las imágenes bien sea en movimiento o de manera estática. El protocolo para la cirugía guiada

da con neuronavegador sigue los siguientes pasos: 1-Adquisición de las imágenes. 2-Registro y correlación. 3-Planificación 4-Procedimiento. El principal problema de la craneotomía volumétrica estereotáctica guiada por imágenes es el desplazamiento del parénquima cerebral luego de la aper-

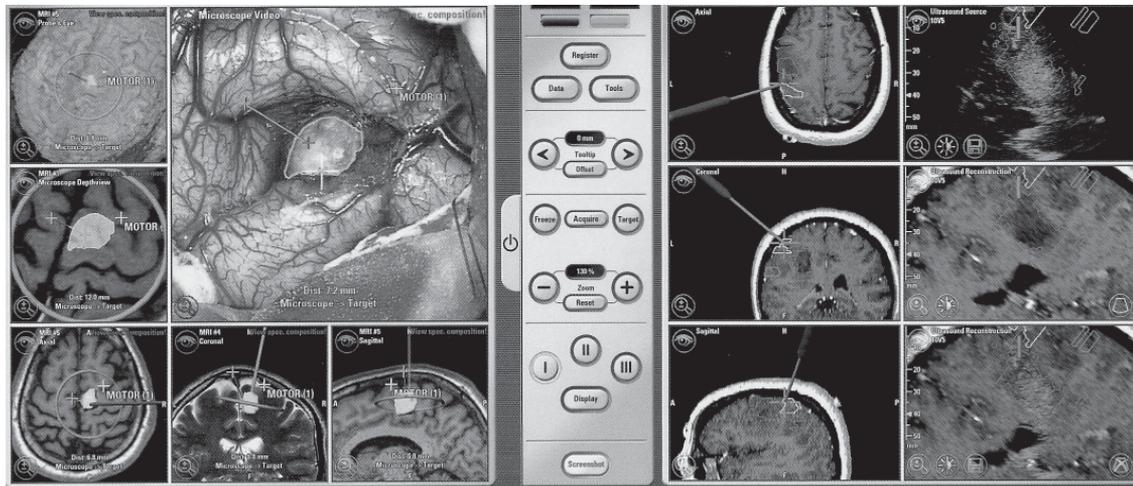


Figura 20. Sistemas de Neuronavegación (Imágenes provistas por Morgantown, WV, USA, UH Marburg, Germany)

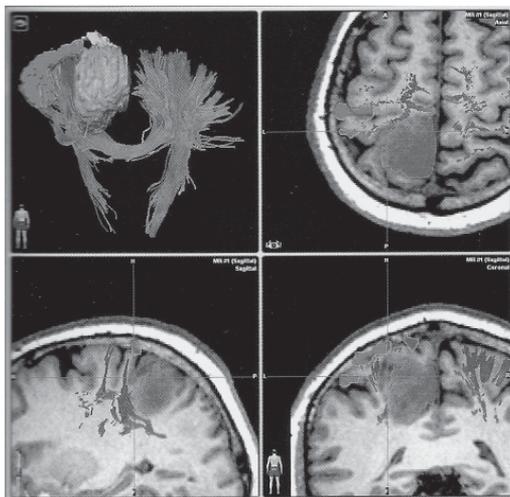


Figura 21. Vistas multiplanares y reconstrucción 3D provistas por Software de sistema de Neuronavegación (UCLA, los Ángeles, CA, USA).

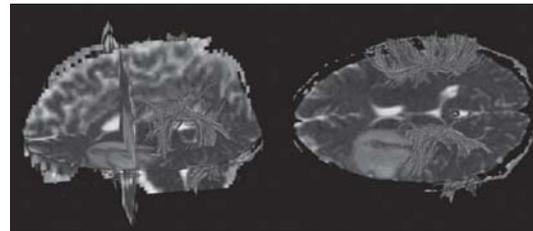


Figura 22. Tractografía.

tura dural. Para ello se recomienda siempre realizar una trayectoria quirúrgica lo mas verticalmente posible, ya que si ocurre un desplazamiento, este se realiza principalmente hacia abajo ⁽⁹⁾.

Estimulación cerebral profunda

La estimulación cerebral profunda (ECP) crónica es un procedimiento relativamente nuevo pero muy prometedor para el tratamiento de los movimientos anormales, dolor, psicocirugía y epilepsia. En el área de los movimientos anormales los blancos quirúrgicos, teóricamente racionales y las técnicas de localización son similares a aquellos aplicados a los procedimientos ablativos (radiofrecuencia). Los tres blancos que en la actualidad, en la mayoría de los centros están bajo estudio y aplicación clínica son: el Vim, GPI, y NST. ^(19,20) (Figura 23)

La ECP se basa en la observación de que la estimulación eléctrica de blancos específicos cerebrales pueden imitar el efecto de lesión sin la destrucción de tejido cerebral fue iniciada por Benabid y Cols. en 1989 y consiste en la colocación de un electrodo con cuatro contactos en el área blanco conectados a un generador interno que se coloca subcutáneo en el área subclavicular. ⁽²¹⁾ (Figuras 24 a 29)

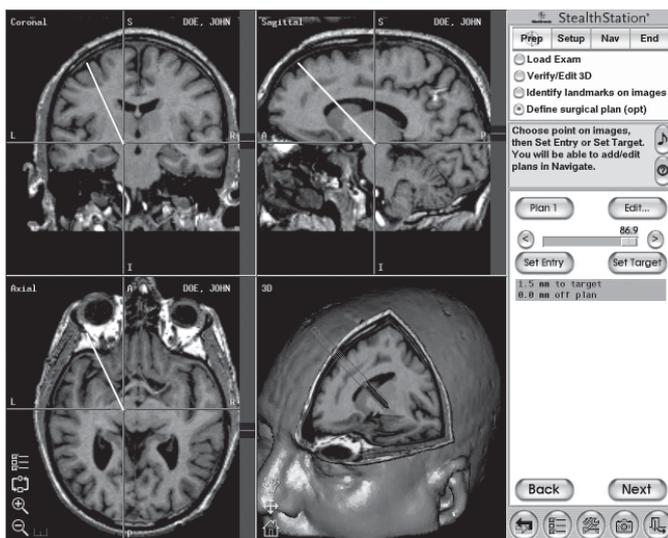


Figura 23. Planiamiento de abordaje al núcleo subtalámico

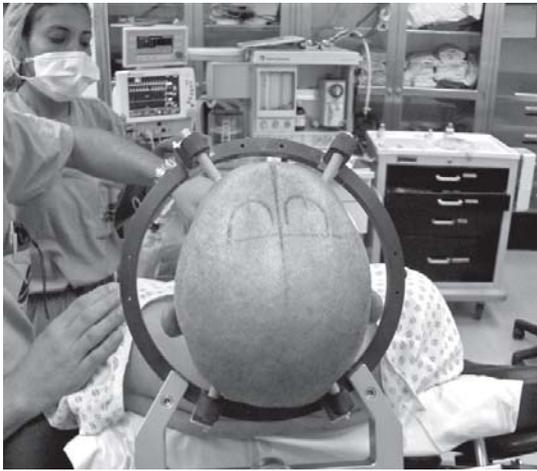


Figura 24. Colocación de anillo estereotáctico para cirugía funcional.

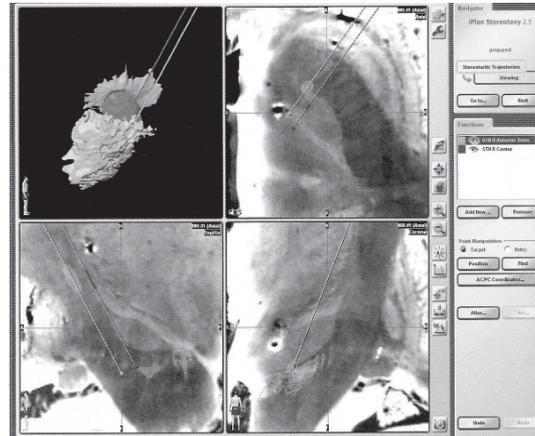


Figura 25. Planeamiento estereotáctico mediante fusión de imágenes y reconstrucción 3D para visión multiplanar de trayectoria de electrodos.



Figura 26. Sistema de localización estereotáctica para cirugía funcional.



Figura 27. Cirugía en suit de TAC.



Figura 28. Verificación transoperatoria de trayectoria de electrodos en vista coronal.



Figura 29. Verificación transoperatoria de trayectoria de electrodos en vista sagital.

La estimulación cerebral para la epilepsia y psicocirugía será probablemente el tratamiento de elección del futuro.

El crecimiento del número de drogas anticonvulsivantes y la opción quirúrgica de la estimulación cerebral en pacientes sin adecuada respuesta terapéutica con los mejores tratamientos actuales, dan al paciente nuevas esperanzas de tratamiento. ⁽²²⁾

En el área de la cirugía de las epilepsias las experiencias del grupo de Velasco, ⁽²³⁾ con la estimulación del núcleo talámico centromediano y el grupo de Benabid ⁽²¹⁾ con el núcleo subtalámico; en el área del dolor (estimulación talámica, sustancia gris periacuaductal o corteza motora) los grupos de los doctores Tsubokawa ⁽²⁴⁾ Rezaei, ⁽²⁵⁾ Levy; ⁽²⁶⁾ la serie publicada por Nuttin ⁽²⁷⁾ sobre los resultados a largo plazo de la estimulación en la capsula anterior para el tratamiento del trastorno obsesivo compulsivo (TOC), nos muestran nuevas aplicaciones terapéuticas que surgen con esta tecnología.

Radiocirugía estereotáctica

El término de "radiocirugía estereotáctica" fue introducido por Lars Leksell en 1951. ⁽²⁸⁾ La radiocirugía estereotáctica se basa en el principio de hacer llegar una dosis única de alta energía, con mucha precisión a un volumen de tejido patológico o sano, previamente escogido mediante métodos imagenológicos (TAC, RM, panangiografía) evitando al máximo irradiar en forma significativa el tejido vecino. ⁽²⁹⁾ Hay tres maneras de generar esta energía y

realizar la radiocirugía: LINAC (Figura 30), Gamma Knife (Figura 31) y Ciclotron.

El primero emplea rayos X, el segundo rayos gamma y el tercero un haz de partículas. De manera muy simplificada, la secuencia aplicada a la radiocirugía es la siguiente: Localización estereotáctica de un volumen de tejido (blanco estereotáctico), cálculo de sus dimensiones, planeamiento de la isodosis e irradiación estereotáctica externa, ⁽³⁰⁾ por esto requiere de la participación de un equipo multidisciplinario como son: un neurocirujano, un radioterapeuta oncológico y un físico.

Esta clase de tecnología tiene en la actualidad muchas aplicaciones terapéuticas en diferentes áreas: oncológica, funcional (dolor, movimientos anormales, epilepsia, psicocirugía) y vascular. (Acelerador lineal)

Hacia el futuro

Hoy en día se puede contar de salas de cirugía "inteligentes", las cuales integran los sistemas de diagnóstico (RM/TAC) intraoperatorios e instrumentos quirúrgicos (Neuronavegadores, microscopios) para resolver casos de alta complejidad. (Figura 32)

Nanotecnología

Durante los últimos quince años ha habido un gran progreso en los sistemas de neuromodulación de la macroestimulación a la microestimulación hasta los nanoelectrodos, los cuales pueden monitorizar y modular la función neuronal a nivel neuronal, axonal e intracelular.

Para aplicar esta tecnología hay todavía algunos interrogantes que resolver como son: la compatibilidad biológica a largo plazo y la toxicidad de los nanoneuromoduladores. En los próximos 15 años la neuromodulación debe ir mas allá del dolor o movimientos anormales y poder ofrecer la habilidad de monitorizar y modular el sistema nervioso central al nivel de subnucleos o de una simple neurona para el tratamiento de lesiones de la médula espinal, ACV y depresión entre otros ⁽³¹⁾. (Figura 33)



Figura 30. Acelerador lineal

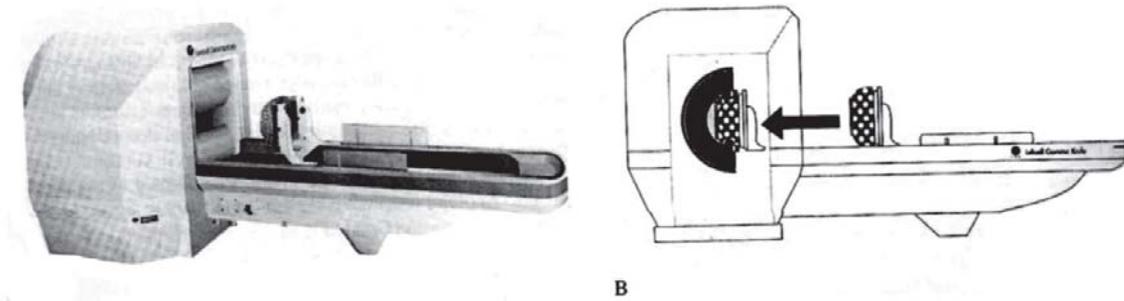


Figura 31. Gamma Knife

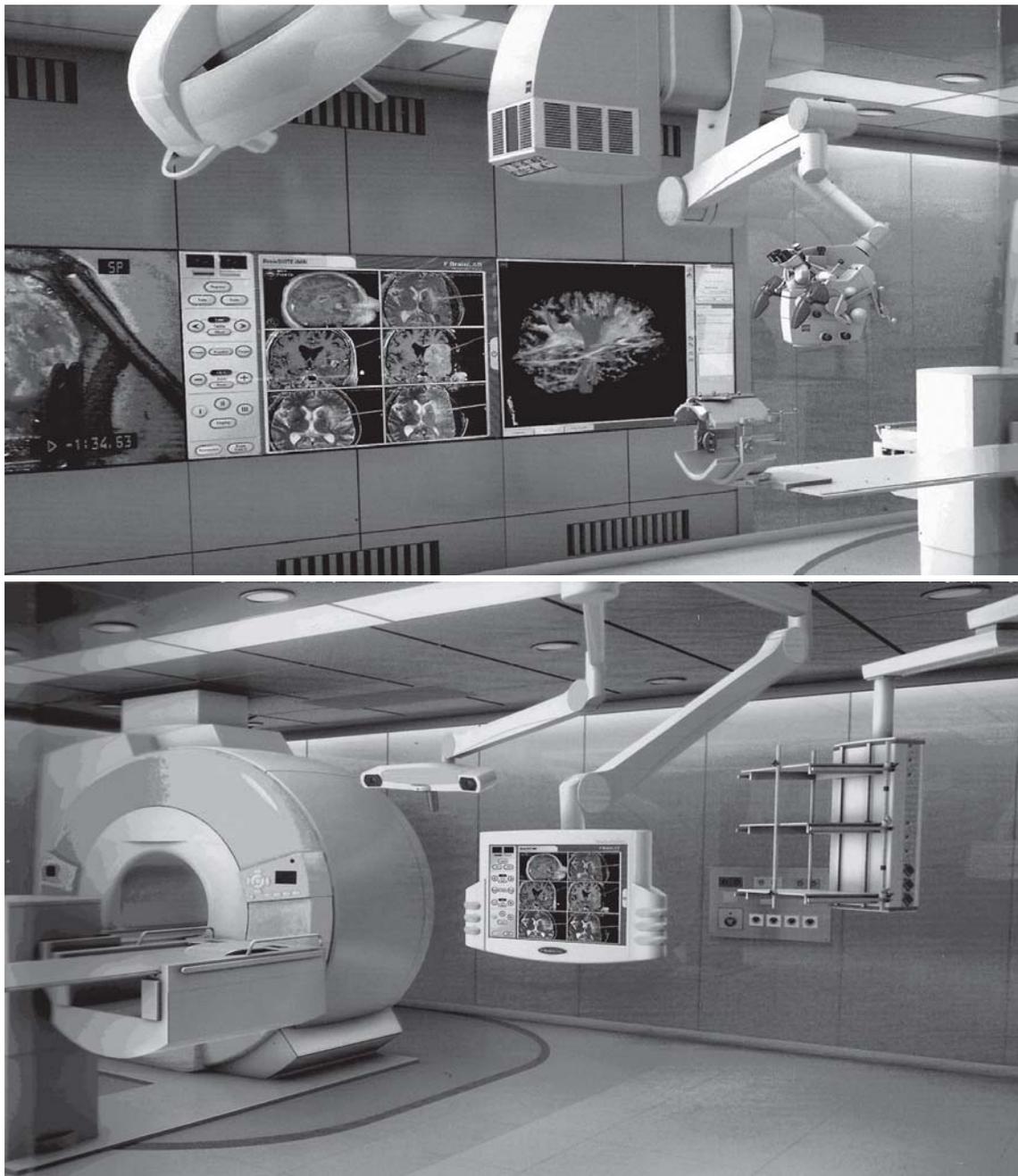


Figura 32. Diferentes ángulos de visión de una sala de cirugía "Inteligente"

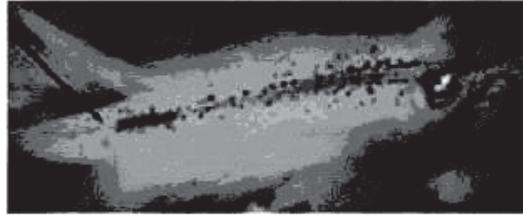


Figura 33. Neuromodulación y nanotecnología. Figuras tomadas de *Neurosurgery* 2006;58(6):1009-26.⁽³²⁾

Bibliografía

- Horsley V, Clarke RH. The structure and functions of the cerebellum examined by a new method. *Brain* 1908;31:45-124.
- Spiegel EA, Wycis HT, Marks M, et al.: Stereotaxic apparatus for operations on the human brain. *Science* 1947;106:349-50.
- Spiegel EA, Wycis HT. Stereoecephalotomy, Thalamotomy and Related Procedures: Part I-Methods and Stereotaxis Atlas of the Human Brain. New York: Grune & Stratton; 1952.
- Morita A, Kelly PJ. Resection of intraventricular tumors via a computer-assisted volumetric stereotactic approach. *Neurosurgery* 1993;32(6):920-6; discussion 926-7.
- Apuzzo ML. The Richard C. Schneider Lecture. New dimensions of neurosurgery in the realm of high technology: possibilities, practicalities, realities. *Neurosurgery* 1996;38(4):625-37; discussion 637-9.
- Benedetti JC, Herrera P, Fandiño J. Biopsia estereotáctica seriada experiencia en el Hospital Neurológico - LCE - FIRE. *Neurociencias en Colombia* 2002;10(1-2):49-54.
- Mundinger F. CT stereotactic biopsy for optimizing the therapy of intracranial processes. *Acta Neurochir Suppl (Wien)* 1985;35:70-4.
- Lunsford LD, Martinez AJ. Stereotactic exploration of the brain in the era of computed tomography. *Surg Neurol* 1984;22(3):222-30.
- Barnett GH: Stereotactic techniques in the management of brain tumors. *Contemp Neurosurg* 1997;19:1-9.
- Abernathy CD, Camacho A, Kelly PJ. Stereotaxic suboccipital transcerebellar biopsy of pontine mass lesions. *J Neurosurg* 1989;70(2):195-200.
- Spiegelmann R, Friedman WA. Stereotactic suboccipital transcerebellar biopsy under local anesthesia using the Cosman-Roberts-Wells frame. Technical note. *J Neurosurg* 1991;75(3):486-8.
- Grossmith J, Rosenblum ML. Biopsy Considerations in Acquired Immunodeficiency Syndrome. In: *Gildenberg PL, Tasker RR, editors. Textbook of Stereotactic and Functional Neurosurgery*. New York: McGraw-Hill; 1998. p. 437-42.
- Nicolato A, Gerosa M, Piovani E, Ghimenton C, Luzzati R, Ferrari S, et al. A. Computerized tomography and magnetic resonance guided stereotactic brain biopsy in nonimmunocompromised and AIDS patients. *Surg Neurol* 1997;48(3):267-76; discussion 276-7.
- Waltregny A, Maula AA, Brucher JM. Contribution of stereotactic brain biopsies to the diagnosis of presenile dementia. *Stereotact Funct Neurosurg* 1990;54-55:409-12.
- Heffez DS. Stereotactic transsylvian, transinsular approach for deep-seated lesions. *Surg Neurol* 1997;48(2):113-24.
- Benedetti JC, De la Rosa G, Torres M, Castillo E. Craneotomías, resecciones volumétricas y lesionectomías guiadas por estereotaxia. Serie de 60 casos. *Neurociencias en Colombia* 2005;13(1):15-20.
- Benedetti JC, Fonnegra A, Torres M, Castillo E, Fandiño J. Lesionectomías de tumores de bajo grado de malignidad en pacientes con epilepsia opercular bajo guía estereotáctica, mapeo funcional cortical y despertar intraoperatorio. *Neurociencias en Colombia* 2005;13(1):21-6.
- Kelly PJ. Volumetric stereotactic surgical resection of intra-axial brain mass lesions. *Mayo Clin Proc* 1988;63(12):1186-98.
- Benabid AL, Minotti L, Koudsié A, de Saint Martin A, Hirsch E. Antiepileptic effect of high-frequency stimulation of the subthalamic nucleus (corpus luyisi) in a case of medically intractable epilepsy caused by focal dysplasia: a 30-month follow-up: technical case report. *Neurosurgery* 2002;50(6):1385-91; discussion 1391-2.
- Benedetti JC. Estimulación del globo pálido interno para el tratamiento de la enfermedad de Parkinson. *Neurociencias en Colombia* 2006;14(2):59-64.
- Benabid AL, Pollak P, Hommel M, Gaio JM, de Rougemont J, Perret J. [Treatment of Parkinson tremor by chronic stimulation of the ventral intermediate nucleus of the thalamus] [Article in French] *Rev Neurol (Paris)*. 1989;145(4):320-3.
- Morrell M. Brain stimulation for epilepsy: can scheduled or responsive neurostimulation stop seizures? *Curr Opin Neurol* 2006;19(2):164-8.
- Velasco F, Velasco M, Velasco AL, Jimenez F, Marquez I, Rise M. Electrical stimulation of the centromedian thalamic nucleus in control of seizures: long-term studies. *Epilepsia* 1995;36(1):63-71.
- Tsubokawa T. Motor cortex stimulation for relief of central deafferentation pain. In: *Burchiel KJ, editor. Surgical Management of Pain*. New York: Thieme; 2002. p. 555-64.
- Rezai AR, Lozano AM. Deep brain stimulation for chronic pain. In: *Burchiel KJ, editor. Surgical Management of Pain*. New York: Thieme; 2002. p. 565-574.
- Levy RM. Deep brain stimulation for the treatment of intractable pain. *Neurosurg Clin N Am* 2003;14(3):389-99, vi.
- Nuttin BJ, Gabriëls LA, Cosyns PR, Meyerson BA, Andréewitch S, Sunaert SG, et al. Long-term electrical capsular stimulation in patients with obsessive-compulsive disorder. *Neurosurgery* 2003;52(6):1263-72; discussion 1272-4.
- Leksell L. The stereotaxic method and radiosurgery of the brain. *Acta Chir Scand* 1951;102:316-9.
- Hall WA. Stereotactic radiosurgery in perspective. In: *Cohen AR, Haines SJ, editors. Concepts in Neurosurgery: Minimally Invasive Techniques in Neurosurgery*. Baltimore: Williams & Wilkins; 1995. p. 104-17.
- Kooy HM, van Herk M, Barnes PD, Alexander E 3rd, Dunbar SF, Tarbell NJ, et al. Image fusion for stereotactic radiotherapy and radiosurgery treatment planning. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1994;28(5):1229-34.
- Andrews R, Li J, Cassell A, Chen H, Nguyen-Vu B. Nanotechnology and neuromodulation: brain-machine interface to neural-electrical interface. En: *Libro de Ponencias: XXXII Congreso Latinoamericano de Neurocirugía - CLAN 2006 y 39 Congreso Argentino de Neurocirugía*; 21-26 de octubre. Buenos Aires, Argentina: Asociación Argentina de Neurocirugía. *Revista Argentina de Neurocirugía* 2006;20 Suppl 1:S145.
- Leary SP, Liu CY, Apuzzo ML. Toward the emergence of nanoneurosurgery: part III--nanomedicine: targeted nanotherapy, nanosurgery, and progress toward the realization of nanoneurosurgery. *Neurosurgery* 2006;58(6):1009-26.