
ARTÍCULO DE REVISIÓN
NARRATIVA

UTILIDAD DE ULTRASONIDO INTRAOPERATORIO EN NEUROCIRUGÍA: UNA REVISIÓN NARRATIVA

UTILITY OF INTRAOPERATIVE ULTRASOUND IN NEUROSURGERY: A NARRATIVE REVIEW

UTILIDADE DE ULTRA-SOM INTRAOPERATIVO EM NEUROCIRURGIA: UMA REVISÃO NARRATIVA

Carlos Rivas MD¹, Nancy Villamues MD², Eliana Melo MD³, Karol Gomez MD⁴, Andres Bolaños MD⁵

¹Médico y Cirujano, Universidad del Valle, Urgencias, Fundación Valle del Lili, Cali, Colombia.

² Médica y Cirujana, Universidad del Valle, Urgencias - Cirugía, Clínica Rey David, Cali, Colombia.

³Médica y Cirujana, Universidad de Antioquia, Consulta externa, Bienestar IPS, Bogotá, Colombia.

⁴Médica y Cirujana, Universidad de Caldas, Hospitalización, Clínica Cristo Rey, Cali, Colombia.

⁵ Médico y Cirujano, Universidad del valle, Urgencia, Emermedica, Medellín, Colombia.

Autor de Correspondencia

Carlos Emilio Rivas Chara MD, Urgencias, Fundación Valle del Lili, Cali, Valle del Cauca, Código Postal 760026, Colombia.

Dirección:

Calle 45 #98B-50

Correo Electrónico:
Carlos.emilio.rivas@correounivalle.edu.co

Resumen

Introducción: El uso de imágenes preoperatorias en neurocirugía provee una manera fiable y segura para las planeaciones quirúrgicas. Es bien conocida la utilidad de dichas imágenes para la neuro navegación intra operatoria, sin embargo, su exactitud se ve disminuida por el fenómeno conocido como “Brain Shift”. Es por esto que en neurocirugía desde hace varias décadas se han desarrollado múltiples investigaciones y recopilaciones de datos concernientes al método de apoyo diagnóstico más apropiado para el abordaje quirúrgico intraoperatorio. Se ha demostrado que el ultrasonido (US) cumple de manera exitosa con los requerimientos, mejorando la calidad de la intervención y los resultados.

Materiales y métodos: Se realizó una búsqueda de términos MeSH en las principales bases de datos (PubMed, Cochrane, ScienceDirect, Scielo), posteriormente se realizó una síntesis de los hallazgos encontrados.

Conclusiones: el Ultrasonido Intraoperatorio se ha constituido en una herramienta complementaria útil para las intervenciones neuroquirúrgicas. Por lo anterior se debe fomentar su uso. No se encontraron publicaciones sobre la utilización en Colombia por lo cual es un campo en el cual investigar a futuro.

Palabras Clave: Ultrasonido, Imagen Intraoperatoria, Neurocirugía.

Abstract

Introduction: The use of preoperative images in neurosurgery provides a reliable and safe way for surgical planning. The usefulness of these images for intraoperative neuronavigation is well known. However, the accuracy is diminished by the phenomenon known as “Brain Shift.” For this reason, in neurosurgery for several decades, multiple investigations and data compilations have been carried out regarding the most appropriate diagnostic support method for the intraoperative surgical approach. Ultrasound has been shown to successfully meet the requirements, improving the intervention’s quality and results.

Methods: A search for MeSH terms was performed on the main databases (PubMed, Cochrane, ScienceDirect, Scielo). Then a summary of the results was carried out.

Conclusions: Intraoperative Ultrasound has become a useful complementary tool for neurosurgical interventions. Therefore, its use should be encouraged. No publications were found on its use in Colombia, so it is a field to investigate in the future.

Keywords: Ultrasound, Intraoperative Imaging, Neurosurgery

Resumo

Introdução: O uso de imagens pré-operatórias em neurocirurgia oferece uma forma confiável e segura de planejamento cirúrgico. A utilidade dessas imagens para neuronavegação intraoperatória é bem conhecida. No entanto, a precisão é diminuída pelo fenômeno conhecido como “Mudança do Cérebro”. Por esse motivo, na neurocirurgia há várias décadas, múltiplas investigações e compilações de dados têm sido realizadas a respeito do método de suporte diagnóstico mais adequado para a abordagem cirúrgica intraoperatória. Foi demonstrado que o ultrassom (US) atende com sucesso aos requisitos, melhorando a qualidade e os resultados da intervenção.

Materiais e Métodos: Foi realizada uma busca por termos MeSH nas principais bases de dados (PubMed, Cochrane, ScienceDirect, Scielo). Em seguida, foi realizado um resumo dos resultados.

Conclusões: O ultrassom intraoperatório tornou-se uma ferramenta complementar útil para intervenções neurocirúrgicas. Portanto, seu uso deve ser incentivado. Nenhuma publicação foi encontrada sobre seu uso na Colômbia, portanto, é um campo a ser investigado no futuro.

Palavras-chave: Ultrassom, Imagem Intraoperatória, Neurocirurgia

Introducción.

En neurocirugía desde hace varias décadas se han desarrollado múltiples investigaciones y recopilaciones de datos respecto al método de apoyo diagnóstico más apropiado para el abordaje quirúrgico intraoperatorio de las diferentes lesiones y patologías neuroquirúrgicas, dichas investigaciones surgen bajo la necesidad de tener una delimitación clara de las posibles lesiones a abordar (Giussani et al., 2017; Makuuchi et al., 1998; Sabet et al., 2015)

El desarrollo e implementación de la tecnología en el diagnóstico y tratamiento de lesiones intracerebrales, ha permitido que se estudien diferentes métodos teniendo en cuenta el rendimiento, practicidad, exactitud y costo efectividad. Entre los más estudiados se muestran la resonancia magnética intraoperatoria (iRMI), la tomografía computarizada intraoperatoria (iTC), los sistemas de neuronavegación y la ultrasonografía intraoperatoria (IoUS), cuya aplicación en el campo fue descrita por Jonathan Rubin y otros en la década de los ochenta. Y, que desde entonces forma parte de las técnicas de apoyo y monitorización intraoperatoria rutinarias (Bauer et al., 2014; Chandler et al., 1982; French et al., 1950; Rubin et al., 1980)

En comparación con otras modalidades de imágenes intraoperatorias, se ha demostrado que el US tiene ventajas financieras, facilidad de uso y disponibilidad, gracias a que se utilizan equipos cada vez más pequeños y livianos, que permiten el estudio en espacios limitados, además de su capacidad superior para visualizar ciertas características de los tumores del Sistema Nervioso Central (SNC) como la vascularización, relacionada con las características de los nuevos transductores; lo que ha permitido su uso como modalidad de imagen complementaria para mejorar la delimitación de los márgenes tumorales y la extensión de la resección del tumor pacientes adultos y pediátrico, mejorando la calidad de la intervención y resultados (Backlund et al., 1975; Tejada Solís et al., 2020)

A continuación, se realiza una revisión de la literatura sobre las propiedades de la ecografía, que la posicionan como una herramienta de gran utilidad en el abordaje de las diversas estructuras neurológicas, las indicaciones posibles y el campo de aplicación.

Materiales y métodos

Se realizó una búsqueda de términos MeSH en las principales bases de datos (PubMed, Cochrane, Science Direct, Scielo), posteriormente se realizó una síntesis de los hallazgos encontrados.

Discusión

El conocimiento de la anatomía y ubicación de lesiones dentro del SNC es de vital importancia para determinar el abordaje y la elección entre una u otra intervención terapéutica. Este proceso cobra mayor interés a nivel intraoperatorio, especialmente Neurocirugía Oncológica o lesiones en la base de cráneo, dado que delimitar las lesiones y su correcta resección es el principal determinante del pronóstico a largo plazo del paciente (Mahboob et al., 2016).

En los últimos años el desarrollo de imágenes de Tomografía Computarizada (CT) o Resonancia Magnética Nuclear (IRM), ha generado grandes avances en el manejo y diagnóstico de patologías dentro y fuera del SNC, es por esto que su implementación intraoperatoria se realizó rápidamente. El Ultrasonido (US) a pesar de haber sido descubierto antes, fue relegado por sus limitaciones (mala definición de imágenes en pacientes sin craneotomía y dependencia del operador) (Mahboob et al., 2016; Moiyadi, 2016). Sin embargo, a pesar del entusiasmo generado por el CT y la MRI, pronto se vio el problema de "Brain shift" (Desplazamientos o deformación del tejido cerebral intraoperatorio, que condicional los hallazgos transoperatorios (Ivanov et al., 2010). Gracias a esto la US toma fuerza en el uso durante las cirugías de forma rutinaria. En la actualidad el Modo B del ultrasonido ofrece una resolución visual y espacial de excelente calidad y en casos seleccionados puede ser superior a la IRM (Camp et al., 2017; Unsgård et al., 2011).

A continuación, se realiza un listado de las utilidades del ultrasonido Intraoperatorio (IoUS) en neurocirugía.

Resección de tumores

Teniendo en cuenta que la resección completa con el mínimo daño neurológico, es el objetivo durante una resección tumoral (Naranjo and Méndez, 2018), es fundamental lograr la localización precisa de la extensión del tumor y el mapeo

intraoperatorio de las áreas cerebrales elocuentes del lenguaje, sensibilidad y motora (Cheon, 2015).

Para la adecuada caracterización de las imágenes se requiere diferenciar lo normal de lo patológico, así (Milhorat and Bolognese, 2003):

1. Características de la imagen, estructuras normales.

- Las estructuras hiperecogénicas (brillantes en el loUS) incluyen la hoz, el tentorio, el plexo coroideo y la glándula pineal.
- Las estructuras isoecogénicas (isointensas en el loUS) incluyen el tejido cerebral normal.
- Las estructuras hipoecogénicas (oscuras en el loUS) incluyen el tronco encefálico.
- Las estructuras anecogénicas (sin señal), incluye los ventrículos y las cisternas basales.
- Los vasos sanguíneos dentro del parénquima y el flujo sanguíneo intravascular pueden visualizarse con ecografía Doppler color.

2. Características de la imagen, estructuras patológicas.

Partiendo de los artefactos, los cuerpos extraños densos (metal, vidrio, plástico, fragmentos óseos, etc.) que son hiperecogénicos. La mayoría de los tumores son hiperecogénicos en comparación con el tejido cerebral circundante.

- Las lesiones hiperecogénicas incluyen sangre fresca, la mayoría de las lesiones metastásicas, cavernomas, meningiomas, parte sólida de craneofaringiomas, hemangiomas, cápsula de lesiones quísticas, calcificaciones, cuerpos extraños y algunos gliomas.
- Las lesiones hiperecogénicas moderadas incluyen la mayoría de los tumores gliales, edema y algunas metástasis.
- Las lesiones hipoecogénicas o anecogénicas incluyen la mayoría de las lesiones quísticas, hematomas antiguos, la parte central de un absceso y la parte necrótica de un glioblastoma.
- El edema peri tumoral no se puede representar con tanta facilidad porque es isoecogénico en comparación con el parénquima cerebral circundante. El edema agudo es típicamente menos ecogénico que los tumores y el edema crónico o tejido previamente irradiado es menos predecible y puede ser isoecóico o hiperecóico en relación con el tumor.
- Los tumores infiltrativos y más agresivos varían en su ecogenicidad y composición. Estas lesiones tienden a desplazar los vasos sanguíneos,

por lo que la ecografía Doppler de flujo en color puede ser una herramienta valiosa para delinear los márgenes tumorales en los casos en los que los vasos se han desplazado.

Para la reducción de artefactos, se recomienda introducir la sonda dentro de la cavidad craneal, posteriormente explorar de manera cuidadosa las paredes de la lesión e inspeccionar los márgenes de resección. La realización de esta maniobra no es posible en todos los casos, pero cuando es ejecutada, puede reducir notablemente, si no eliminar, los artefactos de brillo y los efectos de espejo / sombra, ya que la distancia entre el transductor y los posibles focos residuales se acorta (Goren et al., 2013; Sosna et al., 2005).

Arnold-Chiari y Siringomielia

El tratamiento quirúrgico óptimo para la malformación de Arnold-Chiari tipo I, sigue siendo controversial, varios autores argumentan que la descompresión ósea es suficiente para liberar la presión en la unión craneocervical (Munshi et al., 2000; Yeh et al., 2006).

Otros cirujanos defienden la remoción de la lámina cervical, duroplastia, ablación de las tonsilas cerebelares, extracción de las capas externas de la duramadre e implantación de una conexión entre la siringomielia y el tercer y/o cuarto ventrículo cerebral. Esto plantea una disyuntiva dado que entre más complejo e invasivo sea el planteamiento quirúrgico, aumenta la probabilidad de complicaciones (fístula de líquido cefalorraquídeo, formación de pseudomeningocele, infección, cefalea crónica, aumento de estancia hospitalaria y muerte (McGirt et al., 2008). Ante este problema se ha planteado el uso de loUS para determinar en qué pacientes realizar resecciones profundas, en 2006 David D. YEH and cols, realizaron un estudio retrospectivo con 149 pacientes con malformación de Arnold Chiari, encontrando que el loUS era útil para seleccionar pacientes candidatos a duroplastia luego de la resección ósea, los resultados que tuvieron significancia estadística (Leclerc et al., 2020; McGirt et al., 2008).

El departamento de Neurocirugía de la Escuela de Medicina "Johns Hopkins" realiza un trabajo similar en 2008, incluyendo 256 pacientes, dentro de los resultados resaltan, que el uso de loUS beneficia sólo a los pacientes con Arnold Chiari tipo I en casos leves, y que su aplicación en casos moderados o severos no plantea mejores resultados clínicos a largo plazo (Cheon, 2015).

Patología Vascular intracraneal

Las modalidades Doppler del ultrasonido pueden proporcionar información sobre el flujo sanguíneo. Se consideran útiles en las cirugías de Malformación Arteriovenosa y de aneurismas, ya que permiten la retroalimentación en tiempo real de la permeabilidad del vaso o la interrupción del flujo después del aislamiento de la circulación que se realiza de forma quirúrgica, facilitan además la identificación de un aneurisma dentro de un hematoma (Prada et al., 2016; Zahuranec et al., 2006).

El IoUS también ha encontrado utilidad en el manejo de las hemorragias intracraneales (HIC) puesto que la calidad de las imágenes ha mejorado significativamente, de modo que el cirujano puede evaluar las dimensiones de la ICH e identificar estructuras dentro del cerebro en tiempo real. Esta modalidad apoya el concepto de cirugía mínimamente invasiva al permitir la identificación del coágulo cercana a la superficie cortical y de esta manera elegir la trayectoria transcortical más corta para ingresar al coágulo. También facilita la dirección de un instrumento como un aspirador quirúrgico a un punto objetivo en tiempo real. La relación de diversas lesiones con el cerebro circundante puede apreciarse antes, durante y después de la escisión de entidades patológicas vasculares (Padayachy and Fieggen, 2014; Woydt et al., 1998).

Ultrasonido y "Brain shift"

La deformación cerebral es una de las más importantes causas que afectan la precisión de los procedimientos guiados por imagen (Ganau et al., 2019). Dicha deformación está originada por varios factores, incluido el efecto de la gravedad en el cerebro, la pérdida de líquido cefalorraquídeo (LCR), neumocefalia, inflamación del cerebro y manipulación quirúrgicos (Cheon, 2015). una opción para corregir este fenómeno es la utilización de IoUS durante la operación, sumando las imágenes obtenidas para complementarlo a los datos preoperatorias (Ganau et al., 2019). Además, la implementación del IoUS permite un mapeo de las localizaciones homólogas en las imágenes preoperatorias para que el cirujano tenga una mejor comprensión y determinación de la lesión y de las estructuras adyacentes (Letteboer et al., 2005; martínez tamboríni et al., 2013).

Cirugía de columna

Se pueden identificar varias estructuras anatómicas normales y algunas lesiones dentro de la columna mediante la utilización de US, por ejemplo las lesiones tipo masa que se encuentra intramedulares son frecuentemente complejas y contienen componentes sólido y quístico (Milhorat and Bolognese, 2003), figura 4. A pesar de esto, la implementación de loUS para cirugías a nivel de columna es poca; en un estudio realizado por Francesco Prada y Cols, se evidenció que mediante loUS se logra una adecuada visualización de la estructuras, en 9 de 34 paciente el loUS evidenció que el abordaje inicial no fue el indicado, por lo que fue necesario ampliar la zona quirúrgica (Comeau et al., 2000).

Desventajas del loUS

A pesar del progreso que se ha obtenido en la calidad de los transductores, su calidad no se asemeja a otros tipos de imágenes (como la CT y la MRI), además a esto se le suma la dependencia del operador. Además, hay materiales que pueden generar artefactos en la imagen o disminuir su calidad; por ejemplo: sangrado y metal. Por último, sus limitaciones para obtener imágenes a través del hueso limitan su acción (Ganau et al., 2019).

Conclusiones

El loUS ha demostrado ser una herramienta eficaz dentro del quirófano, por esta razón se ha vuelto cada vez más común en las intervenciones neuroquirúrgicas. Sus ventajas permiten una amplia difusión, a pesar de sus limitaciones. Se recomienda la implementación de este tipo de imágenes en los centros neuroquirúrgicos del país, así como una inclusión dentro de los programas curriculares de especialización en neurocirugía, y con ello lograr mejores resultados clínicos postoperatorios. Durante la búsqueda realizada no se encontraron trabajos realizados en el país, esto plantea un área de investigación en la cual indagar a futuro.

Referencias

Backlund, E.O., Levander, B., Greitz, T., 1975. Stereotactic exploration of brain tumours by ultrasound. Acta Radiol Diagn (Stockh) 16, 117-122. <https://doi.org/10.1177/028418517501600202>

Bauer, R., Martin, E., Haegele-Link, S., Kaegi, G., von Specht, M., Werner, B., 2014. Noninvasive functional neurosurgery using transcranial MR imaging-guided focused ultrasound. *Parkinsonism Relat Disord* 20 Suppl 1, S197-199. [https://doi.org/10.1016/S1353-8020\(13\)70046-4](https://doi.org/10.1016/S1353-8020(13)70046-4)

Camp, S.J., Apostolopoulos, V., Raptopoulos, V., Mehta, A., O'Neill, K., Awad, M., Vaqas, B., Peterson, D., Roncaroli, F., Nandi, D., 2017. Objective image analysis of real-time three-dimensional intraoperative ultrasound for intrinsic brain tumour surgery. *J Ther Ultrasound* 5, 2. <https://doi.org/10.1186/s40349-017-0084-0>

Chandler, W.F., Knake, J.E., McGillicuddy, J.E., Lillehei, K.O., Silver, T.M., 1982. Intraoperative use of real-time ultrasonography in neurosurgery. *J Neurosurg* 57, 157-163. <https://doi.org/10.3171/jns.1982.57.2.0157>

Cheon, J.-E., 2015. Intraoperative neurosonography revisited: effective neuronavigation in pediatric neurosurgery. *Ultrasonography* 34, 79-87. <https://doi.org/10.14366/usg.14054>

Comeau, R.M., Sadikot, A.F., Fenster, A., Peters, T.M., 2000. Intraoperative ultrasound for guidance and tissue shift correction in image-guided neurosurgery. *Med Phys* 27, 787-800. <https://doi.org/10.1118/1.598942>

French, L.A., Wild, J.J., Neal, D., 1950. Detection of cerebral tumors by ultrasonic pulses; pilot studies on postmortem material. *Cancer* 3, 705-708. [https://doi.org/10.1002/1097-0142\(1950\)3:4<705::aid-cncr2820030414>3.0.co;2-l](https://doi.org/10.1002/1097-0142(1950)3:4<705::aid-cncr2820030414>3.0.co;2-l)

Ganau, M., Ligarotti, G.K., Apostolopoulos, V., 2019. Real-time intraoperative ultrasound in brain surgery: neuronavigation and use of contrast-enhanced image fusion. *Quant Imaging Med Surg* 9, 350-358. <https://doi.org/10.21037/qims.2019.03.06>

Giussani, C., Riva, M., Djonov, V., Beretta, S., Prada, F., Sganzerla, E., 2017. Brain ultrasound rehearsal before surgery: A pilot cadaver study. *Clin Anat* 30, 1017-1023. <https://doi.org/10.1002/ca.22919>

Goren, O., Monteith, S.J., Hadani, M., Bakon, M., Harnof, S., 2013. Modern intraoperative imaging modalities for the vascular neurosurgeon treating intracerebral hemorrhage. *Neurosurg Focus* 34, E2. <https://doi.org/10.3171/2013.2.FOCUS1324>

Ivanov, M., Wilkins, S., Poeata, I., Brodbelt, A., 2010. Intraoperative ultrasound in neurosurgery - a practical guide. *Br J Neurosurg* 24, 510-517. <https://doi.org/10.3109/02688697.2010.495165>

Leclerc, A., Matveeff, L., Emery, E., 2020. Syringomyelia and hydromyelia: Current understanding and neurosurgical management. *Revue Neurologique*. <https://doi.org/10.1016/j.neurol.2020.07.004>

Letteboer, M.M.J., Willems, P.W.A., Viergever, M.A., Niessen, W.J., 2005. Brain shift estimation in image-guided neurosurgery using 3-D ultrasound. *IEEE Trans Biomed Eng* 52, 268-276. <https://doi.org/10.1109/TBME.2004.840186>

Mahboob, S., McPhillips, R., Qiu, Z., Jiang, Y., Meggs, C., Schiavone, G., Button, T., Desmulliez, M., Demore, C., Cochran, S., Eljamel, S., 2016. Intraoperative Ultrasound-Guided Resection of Gliomas: A Meta-Analysis and Review of the Literature. *World Neurosurg* 92, 255-263. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2016.05.007>

Makuuchi, M., Torzilli, G., Machi, J., 1998. History of intraoperative ultrasound. *Ultrasound Med Biol* 24, 1229-1242. [https://doi.org/10.1016/s0301-5629\(98\)00112-4](https://doi.org/10.1016/s0301-5629(98)00112-4)

Martínez tamboríni, nicolás, Báez, A., Casas Parera, I., Halfon, M., Báez, M., Blumenkrantz, Y., Kuchkaryan, V., Robles, P., Igirio Gamero, J., Canabal, J., Larrarte, G., Roffo, A., Banfi, N., Campero, A., Campanucci, V., Hurevich, P., Lozano, C., 2013. Tumores gliales del sistema nervioso: planificación y porcentaje de resección. *Neurología Argentina* 5, 129-132. <https://doi.org/10.1016/j.neuarg.2013.02.004>

McGirt, M.J., Attenello, F.J., Dato, G., Gathinji, M., Atiba, A., Weingart, J.D., Carson, B., Jallo, G.I., 2008. Intraoperative ultrasonography as a guide to patient selection for duraplasty after suboccipital decompression in children with Chiari

malformation Type I. J Neurosurg Pediatr 2, 52-57.
<https://doi.org/10.3171/PED/2008/2/7/052>

Milhorat, T.H., Bolognese, P.A., 2003. Tailored operative technique for Chiari type I malformation using intraoperative color Doppler ultrasonography. Neurosurgery 53, 899-905; discussion 905-906.
<https://doi.org/10.1227/01.neu.0000083591.22113.cb>

Moiyadi, A.V., 2016. Intraoperative Ultrasound Technology in Neuro-Oncology Practice-Current Role and Future Applications. World Neurosurg 93, 81-93.
<https://doi.org/10.1016/j.wneu.2016.05.083>

Munshi, I., Frim, D., Stine-Reyes, R., Weir, B.K., Hekmatpanah, J., Brown, F., 2000. Effects of posterior fossa decompression with and without duraplasty on Chiari malformation-associated hydromyelia. Neurosurgery 46, 1384-1389; discussion 1389-1390. <https://doi.org/10.1097/00006123-200006000-00018>

Naranjo, Y.A.D., Méndez, J.L.F., 2018. Ultrasonido intraoperatorio para detección de tumores intracraneales. Revista Cubana de Neurología y Neurocirugía 8.
Padayachy, L.C., Fieggen, G., 2014. Intraoperative ultrasound-guidance in neurosurgery. World Neurosurg 82, e409-411.
<https://doi.org/10.1016/j.wneu.2013.09.052>

Prada, F., Solbiati, L., Martegani, A., Dimeco, F., 2016. Intraoperative Ultrasound (IOUS) in Neurosurgery: From Standard B-mode to Elastasonography, Intraoperative Ultrasound (IOUS) in Neurosurgery: From Standard B-mode to Elastasonography. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25268-1>

Rubin, J.M., Mirfakhraee, M., Duda, E.E., Dohrmann, G.J., Brown, F., 1980. Intraoperative ultrasound examination of the brain. Radiology 137, 831-832.
<https://doi.org/10.1148/radiology.137.3.6255514>

Sabet, H., Stack, B., Nagarkar, V., 2015. A Hand-Held, Intra-Operative Positron Imaging Probe for Surgical Applications. IEEE Transactions on Nuclear Science 62, 1-1. <https://doi.org/10.1109/TNS.2015.2446434>

Sosna, J., Barth, M.M., Kruskal, J.B., Kane, R.A., 2005. Intraoperative sonography for neurosurgery. J Ultrasound Med 24, 1671-1682.
<https://doi.org/10.7863/jum.2005.24.12.1671>

Tejada Solís, S., Quintana Schmidt, C. de, Gonzalez Sánchez, J., Fernández Portales, I., Álamo de Pedro, M. del, Rodríguez Berrocal, V., Díez Valle, R., 2020. Imagen intraoperatoria en el quirófano de neurocirugía: revisión de las técnicas más empleadas para la cirugía de los tumores cerebrales. Neurocirugía (Soc. Luso-Esp. Neurocir.) 184–194.

Unsgård, G., Solheim, O., Lindseth, F., Selbekk, T., 2011. Intra-operative imaging with 3D ultrasound in neurosurgery. Acta Neurochir Suppl 109, 181–186. https://doi.org/10.1007/978-3-211-99651-5_28

Woydt, M., Perez, J., Meixensberger, J., Krone, A., Soerensen, N., Roosen, K., 1998. Intra-operative colour-duplex-sonography in the surgical management of cerebral AV-malformations. Acta Neurochir (Wien) 140, 689–698. <https://doi.org/10.1007/s007010050164>

Yeh, D.D., Koch, B., Crone, K.R., 2006. Intraoperative ultrasonography used to determine the extent of surgery necessary during posterior fossa decompression in children with Chiari malformation type I. J Neurosurg 105, 26–32. <https://doi.org/10.3171/ped.2006.105.1.26>

Zahuranec, D.B., Gonzales, N.R., Brown, D.L., Lisabeth, L.D., Longwell, P.J., Eden, S.V., Smith, M.A., Garcia, N.M., Hoff, J.T., Morgenstern, L.B., 2006. Presentation of intracerebral haemorrhage in a community. J Neurol Neurosurg Psychiatry 77, 340–344. <https://doi.org/10.1136/jnnp.2005.077164>