

# Dispositivos no invasivos de neuromonitorización para la detección de isquemia cerebral intraoperatoria: una revisión exploratoria

Non-invasive neuromonitoring devices for the detection of intraoperative cerebral ischemia: A scoping review

Esteban García-Espitia<sup>1\*</sup>, Juan Pablo Pacheco-Alba<sup>2\*</sup>, Eduardo Tuta-Quintero<sup>3\*</sup>, David Charry-Borrero<sup>4\*</sup>, Daniel Botero-Rosas<sup>5\*</sup>

## RESUMEN

**Introducción:** La isquemia cerebral es una de las complicaciones perioperatorias más catastróficas. En la actualidad, existen diversos dispositivos no invasivos para la detección intraoperatoria de isquemia cerebral.

**Objetivo:** Realizar una revisión sistemática de la literatura con el fin de evaluar la validez diagnóstica de estos métodos para detectar isquemia cerebral intraoperatoria bajo anestesia general, ya que hasta ahora no se cuenta con un estándar de oro para

estos pacientes. **Métodos:** Se realizó una búsqueda bibliográfica de toda la literatura en las bases de datos PubMed, Science Direct, Web of Science y Ovid. Fueron incluidos estudios experimentales y observacionales de tipo analítico, realizados en adultos llevados a cirugía bajo anestesia general, con dispositivos de neuromonitorización intraoperatoria y análisis del desenlace neurológico dentro de los cuales evaluarán la validez diagnóstica de los diferentes métodos usados.

**Resultados:** Se incluyeron 22 artículos para la revisión sistemática; la validez diagnóstica de los dispositivos fue muy heterogénea y dependiente del método usado, pacientes incluidos, punto de corte para detectar IC y estándar de referencia. **Conclusión:** Existe gran variabilidad en la validez diagnóstica reportada. Se requieren estudios que comparen múltiples dispositivos de neuromonitorización intraoperatoria en pacientes bajo anestesia general de manera simultánea y con el mismo estándar de referencia para obtener valores acertados de su precisión diagnóstica.

**Palabras clave:** Isquemia cerebral, anestesia, diagnóstico, neuromonitorización, intervenciones quirúrgicas.

DOI: <https://doi.org/10.47307/GMC.2021.129.4.11>

ORCID: 0000-0003-2190-5813<sup>1\*</sup>

ORCID: 0000-0002-6167-862X<sup>2\*</sup>

ORCID: 0000-0002-7243-2238<sup>3\*</sup>

ORCID: 0000-0002-6167-862X<sup>4</sup>

ORCID: 0000-0002-2590-0756<sup>5\*</sup>

\*Facultad de Medicina, Universidad de La Sabana, Chía, Colombia.

Autor correspondencia: Daniel Alfonso Botero-Rosas. MD, MSc, PhD

E-mail: [daniel.botero@unisabana.edu.co](mailto:daniel.botero@unisabana.edu.co)

Campus del Puente del Común, Km. 7, Autopista Norte de Bogotá, Chía, Cundinamarca, Colombia

Médico, MSc, PhD en ingeniería Biomédica, director del grupo de investigación PROSEIM, Profesor asociado al área de Morfofisiología, Universidad de La Sabana, Chía, Colombia.

Recibido: 6 de agosto 2021

Aceptado: 19 de septiembre 2021

## SUMMARY

**Introduction:** Cerebral ischemia is one of the most catastrophic perioperative complications. Currently, there are several non-invasive devices for intraoperative detection of cerebral ischemia.

**Objective:** Carry out a systematic review of the literature to evaluate the diagnostic validity of these

*methods for detecting intraoperative cerebral ischemia under general anesthesia, because nowadays there is no gold standard for these patients. **Methods:** PubMed, Science Direct, Web of Science, and Ovid databases we search for experimental and observational analytical studies, carried out in adults undergoing surgery under general anesthesia, with intraoperative neuromonitoring devices, analysis of neurological results, and evaluation of diagnostic accuracy of each method were included. **Results:** 22 articles were included for the systematic review; The diagnostic validity of the devices was very heterogeneous and depended on the method used, including the patients, the cut-off point for detecting heart failure, and the reference standard. **Conclusion:** There is great variability in the reported diagnostic validity. Studies comparing multiple intraoperative neurological monitoring devices in patients under general anesthesia simultaneously and with the same reference standard are required to obtain precise values for their diagnostic precision.*

**Keywords:** Cerebral ischemia, anesthesia, diagnosis, neuromonitoring, surgical interventions.

## INTRODUCCIÓN

Las complicaciones neurológicas perioperatorias son causa importante de morbilidad que conlleva a un aumento en el gasto de los recursos hospitalarios, deterioro de la calidad de vida y secuelas a largo plazo (1). La isquemia cerebral (IC) es una complicación perioperatoria catastrófica con una incidencia variable según el tipo de cirugía que se lleve a cabo. En la gran mayoría de cirugías no cardíacas, no neurológicas y pequeñas cirugías, la frecuencia de presentación de accidente cerebrovascular (ACV), generalmente es baja (0,1%-1,9 %). Sin embargo, para la cirugía cardiovascular y neurocirugía, esta incidencia puede aumentar hasta el 10 % (1,2).

Las complicaciones relacionadas con la IC más frecuentes son el deterioro cognitivo posoperatorio, delirium, estancia prolongada en hospitalización y en unidades de cuidado intensivo, y aumento en la presentación de disfunción orgánica (3,4). Es por ello, que mantener un flujo sanguíneo cerebral (FSC) adecuado durante los procedimientos quirúrgicos, se convierte en un objetivo primordial durante el transcurso del acto anestésico. La detección

temprana de la IC o su sospecha puede conducir a la instauración de medidas neuroprotectoras que prevengan complicaciones neurológicas durante el período pre y posoperatorio (5,6).

A lo largo de los años se han usado diversos dispositivos no invasivos para el monitoreo neurológico intraoperatorio y de la potencial isquemia tisular que se puede presentar en el transcurso de la cirugía: espectroscopía cercana al infrarrojo (NIRS), electroencefalograma (EEG), doppler transcraneal (TCD), potenciales evocados (EP) somatosensoriales (SSEP), motores (MEP) y auditivos del tallo cerebral (BAEP), y las imágenes contrastadas de laser moteado (LSCI) (7). Dado que los diferentes métodos nombrados anteriormente han sido descritos en diversos artículos, el objetivo de este estudio es realizar una revisión sistemática cualitativa de la literatura científica con el fin de evaluar la validez diagnóstica de los dispositivos utilizados para detectar IC en escenarios quirúrgicos bajo anestesia general, ya que hasta la fecha no se ha definido el estándar de oro para diagnosticar IC en estos pacientes.

## MÉTODOS

Siguiendo las guías PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), se realizó la búsqueda de toda la literatura publicada hasta el 10 de febrero del 2020 en las bases de datos *Scopus*, *PubMed*, *Science Direct* y *Web Of Science* usando la combinación de las siguientes palabras clave utilizando sinónimos, términos indexados, truncadores y operadores de proximidad: “*electroencephalography*”, “*transcranial doppler ultrasonography*”, “*evoked potentials*”, “*motor evoked potentials*”, “*somatosensory evoked potentials*”, “*spectroscopy near-infrared*”, “*laser speckle contrast imaging*”, “*intraoperative neurophysiological monitoring*”, “*diagnostic accuracy*”, “*brain ischemia*” y “*surgery*”.

### Criterios de elegibilidad

Se consideraron estudios experimentales y observacionales de tipo analítico, con inclusión de

población adulta llevados a cirugía cardíaca o no cardíaca bajo anestesia general con dispositivos de neuromonitorización y análisis del desenlace neurológico, dentro de los cuales evaluarán la validez diagnóstica de los diferentes métodos usados intraoperatoriamente para la detección de IC. Se excluyeron todos aquellos estudios no realizados en humanos, los que evaluaban los dispositivos de neuromonitorización en escenarios diferentes a cirugía, procedimientos realizados bajo anestesia local, aquellos que usaban dispositivos invasivos y los que estuvieran en idioma diferente a inglés o español.

### Dispositivos de neuromonitorización

NIRS utiliza una fuente de luz infrarroja para medir la saturación regional de oxihemoglobina o el índice de oxigenación tisular. A través de esta se puede monitorear de manera continua, el equilibrio entre el suministro y el consumo cerebral de oxígeno (3,6,8). El EEG puede reflejar indirectamente el FSC midiendo los potenciales eléctricos cerebrales (9,10). La matriz de densidad espectral (DSA) muestra la distribución de la fuerza del EEG en relación con la frecuencia a lo largo del tiempo, para relacionarse con períodos de IC (11). El TCD puede monitorear de forma continua la velocidad del flujo sanguíneo en la arteria cerebral media (ACM) reflejando el FSC. Esto es de gran importancia debido a que la ACM proporciona aproximadamente el 40 % del flujo sanguíneo hemisférico (9,12,13). El monitoreo con PE es capaz de evaluar la integridad de la vía neuronal; existen varios tipos de PE útiles para evaluar IC: los SSEP, MEP y BAEP. Los primeros, monitorean la vía nerviosa entre los nervios periféricos (donde se aplica el estímulo) y el sistema nervioso central (donde se registra la respuesta) (14). Los MEP, permiten evaluar la vía motora desde la corteza cerebral, hasta las vías periféricas (15) y se dividen en dos tipos dependiendo de la técnica utilizada, los MEP Transcraneales y los MEP de estimulación cortical directa (16). Por último, los BAEP muestran los cambios eléctricos cerebrales producidos por los estímulos auditivos (17). LSCI proporciona una visión completa y con alta resolución espacial del FSC en tiempo real, usando instrumentación de fácil acceso (diodo láser de baja potencia, óptica de imagen y cámara) lo que permite un monitoreo

no invasivo en el paciente (18,19).

### Selección y extracción de datos

Dos autores de manera independiente seleccionaron los estudios. Primero se revisaron y seleccionaron los títulos y resúmenes, luego se eligieron los artículos para lectura completa, y finalmente se revisaron y seleccionaron los artículos que cumplieron con los criterios de inclusión. En caso de desacuerdo, un tercer autor fue consultado.

La extracción de datos fue realizada por dos autores de manera independiente utilizando una matriz de extracción de datos con: nombre del primer autor, año de publicación, diseño del estudio, procedimiento quirúrgico, número de pacientes, método de neuromonitorización intraoperatoria a evaluar, estándar de referencia usado en el estudio, punto de corte para definir IC y validez diagnóstica de los métodos de neuromonitorización evaluados.

## RESULTADOS

La búsqueda de las palabras clave identificó 3879 artículos de los cuales 757 fueron duplicados. De los 3 122 artículos restantes, posterior a realizar la lectura del título y el resumen se excluyeron 3 069. Para la revisión en texto completo se tomaron 53, de los cuales 31 fueron excluidos por: solo resumen (n=2), idioma alemán (n=1), no evaluar validez diagnóstica (n=22), procedimientos bajo anestesia local (n=4) y monitorización invasiva (n=2). Así, 22 artículos cumplieron los criterios de elegibilidad y fueron incluidos en la revisión sistemática. Figura 1.

### Características de los estudios

Todos los estudios fueron observacionales, (n=15) de tipo prospectivo y (n=7) de tipo retrospectivo. En ellos se evaluaron: SSEP, NIRS, TCD, MEP, EEG, SSEP combinado con EEG, SSEP combinado con MEP, BAEP y DSA. No se encontró ningún estudio relacionado con LSCI. Las cirugías realizadas en los pacientes evaluados en estos estudios fueron: endarterectomía

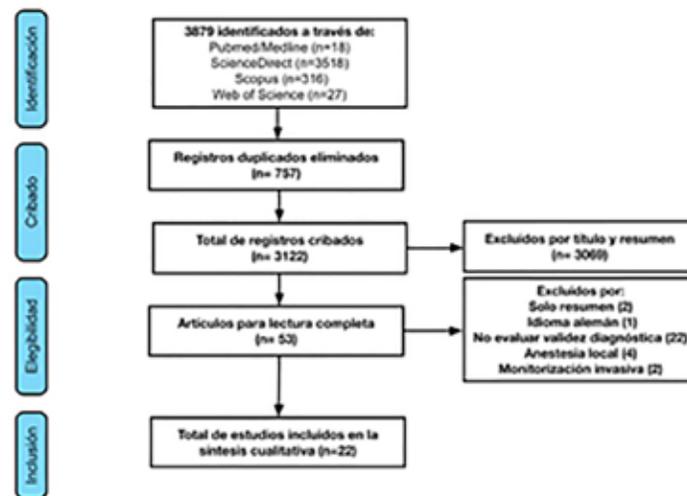


Figura 1.

carotídea (EC), corrección de aneurismas intracraneales, EC más revascularización de arteria coronaria, EC más derivación de arteria subclavia o innominada a arteria carótida común, derivación de arteria meníngea media a ACM y cirugía cardíaca o aórtica usando derivación cardiopulmonar. En la Tabla 1 se reportan las características de los estudios incluidos.

Un estudio de 1992 comparó SSEP vs EEG como estándar de referencia en pacientes llevados a EC. Los parámetros usados para que los SSEP determinarán IC fueron: 1) diferencia entre el último tiempo de conducción central previo al pinzamiento cruzado carotídeo y el primer tiempo inmediatamente posterior a este fuera mayor que el umbral establecido en el estudio (umbral de latencia mayor a 0,1, 0,2, 0,3 o 0,4 msec) o 2) una reducción de la amplitud de 50 % o más en la respuesta talamocortical (complejo N19-P23). La sensibilidad de los criterios de latencia para la detección de isquemia aumentó de 22 % (intervalo de confianza (CI) 95 %, 5-39 %) a 43 % (CI 95 % 23-64 %) cuando el umbral de latencia disminuyó de 0,4 a 0,1, respectivamente. La especificidad de los criterios de latencia aumentó de 43 % (CI 95 %, 23-61 %) a 83 % (CI 95 %, 77-90 %) cuando el umbral de latencia aumentó de 0,1 a 0,4, respectivamente. El valor

predictivo positivo (VPP) y el valor predictivo negativo (VPN) más alto fue de 50 % (CI 95 %, 19 %-81 %) y 58 % (CI 95 %, 51 %-66 %), respectivamente para el criterio de latencia de 0,4 msec. Con respecto a la reducción de la amplitud  $\geq 50$  % del complejo N19-P23, la sensibilidad fue de tan solo 4 % (CI 95 %, 1-8,6 %). El estudio no reporta especificidad, VPP o VPN para este último criterio (20).

Kawada y col. realizaron un estudio el que incluyeron a 261 pacientes llevados a cirugía cardíaca o aórtica usando derivación cardiopulmonar con hipotermia moderada o hipotermia profunda más paro cardiopulmonar, en donde evaluaron la validez diagnóstica de SSEP comparado con el examen neurológico postoperatorio (ENP) para diagnosticar lesión cerebral intraoperatoria. Tomando los defectos en P1N1, P2N2, o un aplanamiento en SSEP como reflejo de lesión cerebral cortical, subcortical o profunda difusa, respectivamente, hallaron una sensibilidad de 70 %, especificada del 97,2 %. Sin embargo, no reportan significancia estadística. Concluyen que el monitoreo continuo con SSEP es muy valioso para la predicción temprana de daño cerebral en cirugía cardiovascular usando derivación cardiopulmonar con hipotermia (21).

En un estudio que incluyó 148 pacientes llevados a EC, los SSEP fueron comparados con el ENP. La sensibilidad diagnóstica del monitoreo intraoperatorio con los SSEP para desenlace neurológico posoperatorio fue del 100 %, con una sensibilidad del 97 % y una precisión diagnóstica general del 97 % ( $p < 0,025$ ) cuando había una reducción en la amplitud  $\geq 50$  % o si un SSEP no podía ser identificado (22).

En un estudio realizado en 2017 en 386 pacientes llevados a 429 reparaciones de aneurismas intracraneales se evaluó el rendimiento diagnóstico de forma individual para SSEP y MEP comparándolo con ENP. Un cambio significativo para SSEP y MEP fue la disminución en la amplitud  $\geq 50$  % del valor de la línea de base o el incremento en la latencia  $> 10$  %. La sensibilidad y especificidad de SSEP para déficit motor fue de 25 % y 96 %, respectivamente, con valores predictivos positivos y negativos de 11 % y 98 %, respectivamente. La sensibilidad, especificidad, valor predictivo positivo y valor predictivo negativo de MEP en detectar déficit motor postoperatorio fue de 38 %, 99 %, 30 % y 99 %, respectivamente (3,23).

En un estudio observacional retrospectivo realizado por Thirumala y col. (24) que incluyó 1 165 pacientes llevados a EC y neuro-monitorización intraoperatoria con SSEP y EEG con el objetivo de determinar la validez diagnóstica de estas modalidades de manera individual y combinada comparándolas con el ENP. El punto de corte para detectar IC en SSEP fue la prolongación persistente y consistente de la latencia  $\geq 10$  % o disminución  $\geq 50$  % en la amplitud; para EEG fue la disminución en la amplitud de las frecuencias rápidas  $> 50$  % o aumento en la actividad theta y delta  $> 50$  %. La incidencia de ACV en esa cohorte fue de 2,4 % (28/1 165). Para SSEP, la sensibilidad fue de 42,87 % (CI 95 %, 24,48 %-62,81 %), especificidad del 86,37 % (CI 95 %, 84,23 %-88,31 %), VPP 7,19 % (CI 95 %, 3,77 %-12,22 %) y VPN 98,4 % (CI 95 %, 97,41 %-99,08 %). EEG tuvo una sensibilidad de 28,57 % (CI 95 %, 13,26 %-48,6 %), especificidad de 90,33 % (CI 95 %, 88,46 %-91,98 %), VPP 6,78 % (CI 95 %, 2,98 %-12,93 %) y VPN 98,09 % (CI 95 %, 97,96 %-98,83 %). Finalmente, para los cambios tanto en SSEP como en EEG, se calculó una sensibilidad de 50 % (CI 95 %, 30,66 %-69,34 %), especificidad

81,97 % (CI 95 %, 79,61 %-84,16 %) VPP 6,39 % (CI 95 %, 3,54 %-10,49 %) y VPN 98,52 % (CI 95 %, 97,53 %-99,19 %). El estudio concluye que la precisión diagnóstica de la monitorización dual con SSEP y EEG durante la EC es mayor que cualquiera de las dos modalidades usadas de manera individual (24).

Con respecto a TCD se encontraron un total de 5 estudios donde se evaluaba su validez diagnóstica. Jansen y col. (25) comparó TCD vs EEG en 130 pacientes llevados 152 EC con el objetivo de buscar el punto de corte en reducción de la velocidad del flujo sanguíneo cerebral medido por TCD que mostrará la mayor sensibilidad y especificidad de esta modalidad. El punto de corte para que EEG detectara isquemia cerebral fue la asimetría  $\geq 15$  %. Se encontró que cuando la reducción de la velocidad del pico del flujo sanguíneo cerebral era  $\geq 70$  %, se alcanzó una sensibilidad del 85 % y especificidad del 96 % (31). Kobayashi y col. (35) evaluó TCD vs DWI para evaluar el desempeño diagnóstico del neuro-monitoreo comparándolo con las alteraciones radiológicas postoperatorias. La sensibilidad, especificidad, VPP y VPN de la ausencia de señales microembólicas de la ACM mediante TCD en la fase del retiro del pinzamiento de la arteria carótida externa y la arteria carótida común para predecir el desarrollo de una nueva lesión isquémica postoperatoria fue del 100 %, 94 %, 50 % y 100 % (25).

Con respecto a NIRS, en total 9 estudios evaluaron su validez diagnóstica. De Letter y col. (26) en 1998 buscaron definir nuevos posibles criterios para DC en EC basados en NIRS usando como estándar de referencia el EEG en 101 pacientes. Se determinó que con el punto de corte de disminución del 5 % en la saturación de hemoglobina cerebral, la sensibilidad fue del 100 %, pero con especificidad baja de 44 %. Los valores por encima de este punto de corte resultaron en una mejor especificidad a costas de una disminución importante en la sensibilidad (26). Mille y col., en un estudio que incluyó de 594 pacientes llevados a EC se correlacionó NIRS con ENP. Se identificaron 2 puntos de corte de relevancia en el estudio. El primero, la disminución del 11,7 % en la rSO<sub>2</sub>, la cual mostró una sensibilidad del 75 % (CI 95 %, 71 %-78 %) y una especificidad de 77 % (CI 95 %, 74-80 %). El área bajo la curva ROC indicó una

buena habilidad de discriminación de 0.80 (CI 95 %, 0,65-0,94). El valor predictivo positivo y negativo fue del 10 % y 99 %, respectivamente. El segundo fue el punto de corte de 20 %, el cual tuvo menor sensibilidad (30 %) pero una alta sensibilidad (98 %) para identificar pacientes con complicaciones neurológicas postoperatorias, con un VPP y VPN de 37 % y 98 %, respectivamente (27).

## DISCUSIÓN

Actualmente existen diferentes tipos de dispositivos de neuromonitorización intraoperatoria para la detección de IC: monitoreo de la hemodinamia cerebral (TCD, LSCI), monitoreo del metabolismo de oxígeno cerebral (NIRS) y monitoreo del estado de la función cerebral (EEG, EP) (28,29). A pesar del gran número de publicaciones, ningún método ha demostrado ser superior o prevenir mejor el desenlace posoperatorio (28). La monitorización neurológica del paciente despierto durante la anestesia local es el método más confiable para predecir IC ya que permite la correlación directa entre parámetros clínicos y datos neurofisiológicos (27,28,30). Sin embargo, en un gran número de procedimientos la anestesia local no es la más indicada, por lo que en aquellos pacientes llevados a cirugía bajo anestesia general, la neuromonitorización intraoperatoria es esencial para la detección temprana de lesiones neurológicas guiando el consecuente inicio de diferentes estrategias para evitar complicaciones (27,31).

Se encontraron 13 estudios que evaluaron de manera individual el desempeño diagnóstico de los EP, donde los SSEP tuvieron mejor precisión diagnóstica que MEP y BAEP, teniendo en cuenta que para SSEP se encontraron 10 estudios en total, mientras que de MEP y BAEP, solo 2 y 1, respectivamente. La sensibilidad de SSEP varió entre 4 %, y 100 %, la especificidad entre 43 % y 100 %, el VPP se encontró desde 11 % hasta 100 % y el VPN desde el 50 % al 100 % (21,22,24). Se puede inferir que los estudios que alcanzaron una validez diagnóstica de 100 % lo hicieron probablemente debido a su bajo número de pacientes y consecuentemente, bajo número de casos con IC. Adicionalmente, teniendo en

cuenta que en la actualidad los puntos de corte en los registros de los SSEP que advierten IC no tienen un consenso universal, razón por la cual su rendimiento diagnóstico es variable y dependiente del manejo constituido por el anestesiólogo (45). Teniendo en cuenta lo anterior, los resultados de eficacia de los SSEP pueden variar dependiendo del punto de alarma usado, partiendo del hecho que el FSC normal es de 50 mL/100 g de tejido y los cambios en este registro son sensibles cuando este flujo decrece hasta 14 mL/100 g de tejido (32), justificando la variabilidad de validez diagnóstica de este método. En esta revisión sistemática, el estudio con mayor número de pacientes (1 165), encontró que los SSEP alcanzaron una sensibilidad, especificidad, VPP y VPN de 42,87 % (CI 95 %, 24,48 %-62,81 %), 86,37 % (CI 95 %, 84,23 %-88,31 %), 7,19 % (CI 95 %, 3,77 %-12,22 %) y 98,4 % (CI 95 %, 97,41 %-99,08 %), respectivamente. Se debe tener en cuenta que, a pesar del número de pacientes, este estudio describe que la mayoría de sus procedimientos fueron realizados bajo anestesia general, sin especificar si hubo un número despreciable de cirugías con anestesia local que pudiera afectar el resultado (24).

Con respecto al EEG, el punto de corte con mejor validez diagnóstica (sensibilidad 50 %, especificidad del 100 %, VPP 100 % y VPN 99,3 %) fue con la disminución en la amplitud >75 % de toda la actividad que persistiera por el período completo de la oclusión de la ICA. Estos valores deben ser considerados en el contexto de baja tasa de ACV perioperatorio. Por último, se debe aclarar que los pacientes con déficit neurológico tardío también fueron incluidos en el análisis, cuando estos eventos eran de probable origen embólico postoperatorio y no relacionados a los cambios intraoperatorios de la neuro-monitoría propiamente (33).

En total 5 estudios evaluaron TCD, donde la sensibilidad, especificidad, VPP y VPN variaron entre 75 %-100 %, 92,9 %-98 %, 20-76 % y 99 %-100 %, respectivamente (24,27,29,31). El monitoreo con TCD no solo provee información de cambios hemodinámicos sino también permite la detección de microembolismos (34). Teniendo en cuenta lo anterior, el estudio que demostró mejor validez diagnóstica usaba la detección de señales microembólicas en la ACM como marcador de IC alcanzando una sensibilidad de

100 %, especificidad de 94 %, VPP de 50 % y VPP de 100 % (35).

NIRS ofrece un monitoreo no invasivo en tiempo real de la oxigenación tisular en un gran número de escenarios, dentro de los cuales es común encontrar la medición de la rSO<sub>2</sub> durante cirugía vascular (36). Diversos estudios han evaluado el punto de corte ideal en NIRS para la detección de IC intraoperatoria (37,38). Aquellos encontrados en esta revisión sistemática reportaron diferentes puntos de corte para que NIRS determinará pacientes con IC, razón por la cual es esperable obtener resultados muy variables. La sensibilidad encontrada estuvo entre 5,56 %-100 %, especificidad 4 %-98 %, VPP 10 %-53 % y VPN 98 %-99 %. Se encontró con el  $\Delta rSO_2 \geq 20$  % una sensibilidad y especificidad demasiado bajas (5,56 % (CI 95 %, 1,2 %-15,4 %) y 4 % (CI 95 %, 0,1 %-20,4 %), respectivamente), cuando se comparó NIRS con niveles patológicos de proteínas S100 y NSE, sin embargo, no se reportó ningún evento isquémico y los pacientes seleccionados no tenían ninguna patología de base que pudiera aumentar el riesgo de presentar IC intraoperatoria, subestimando así la precisión diagnóstica del dispositivo (32). Mille y col., realizaron el estudio con mayor número de pacientes que evaluaba la validez diagnóstica de NIRS, encontrando en el análisis ROC, usando EEG como estándar de referencia, que el punto de corte de 11,7 % alcanzó la mejor precisión diagnóstica (sensibilidad 75 %, (CI 95 %, 71 %-78 %) especificidad 77 % (CI 95 %, 74 %-80 %), VPP 10 % y VPN 99 %) (27).

En años recientes, el interés por la neuromonitorización intraoperatoria multimodal ha venido en aumento con el fin de disminuir la incidencia de ACV (28). En nuestra revisión sistemática, se encontraron 3 estudios combinando estos dispositivos (SSEP + EEG (2) y SSEP + MEP (24,32). El estudio que incluyó SSEP + MEP encontró la mejor sensibilidad y especificidad (100 %) para la detección de IC. Sin embargo, incluyó pocos pacientes y no reportó CI (39). Por otro lado, el estudio que evaluó SSEP + EEG y además tuvo el mayor número de pacientes usando neuromonitorización intraoperatoria multimodal, logró una sensibilidad, especificidad, VPP y VPP de 50 % (CI 95 %, 30,66 %-69,34 %), 81,97 % (CI 95 %, 79,61 %-84,16), 6,39 % (CI 95 %, 3,54-10,49) y 98,52 % (97,53-99,19). Este estudio

concluye que es posible lograr mayor precisión diagnóstica combinando los dispositivos de neuromonitorización intraoperatoria que haciendo uso de un único dispositivo (24).

La principal limitación de nuestra revisión sistemática está relacionada con las diferencias significativas encontradas en los estudios de dispositivos de monitorización intraoperatoria para detectar IC, diferentes criterios para definir esta complicación y diferentes puntos de corte usados por los investigadores, lo cual hace complejo determinar la validez diagnóstica real de estos métodos.

## CONCLUSIONES

A pesar de que existen múltiples técnicas de neuromonitorización intraoperatoria, hasta el momento no contamos con un estándar de oro para diagnosticar IC bajo anestesia general. Además, como se pudo observar en este estudio, la variabilidad en el diseño, población incluida, uso de anestésicos, técnicas de neuromonitorización, puntos de corte para determinar isquemia cerebral y estándar de referencia con el que se comparan los dispositivos son muy variables entre los estudios encontrados, lo cual explica la gran diferencia en la precisión diagnóstica reportada. Teniendo en cuenta lo anterior, es esencial poder realizar estudios con mayor población, donde se puedan comparar múltiples métodos de neuromonitorización intraoperatoria (individuales o combinados) en pacientes bajo anestesia general de manera simultánea y con el mismo estándar de referencia. Actualmente, es la combinación de diferentes técnicas de monitoría tanto neurológica como hemodinámica la que permite el diagnóstico y tratamiento de la IC intraoperatoria a través de la interpretación y análisis de un experto.

**Financiación:** Ninguna.

**Conflictos de intereses:** Los autores declaran no tener conflicto de interés.

## REFERENCIAS

1. Hood R, Budd A, Sorond FA, Hogue CW. Perioperative neurological complications. *Anaesthesia*. 2018;73:67-75.
2. Bijker JB, Persoon S, Peelen LM, Moons KGM, Kalkman CJ, Kappelle LJ, et al. Intraoperative Hypotension and Perioperative Ischemic Stroke after General Surgery. *Anesthesiology*. 2012;116(3):658-664.
3. Deschamps A, Hall R, Grocott H, Mazer CD, Choi PT, Turgeon AF, et al. Cerebral Oximetry Monitoring to Maintain Normal Cerebral Oxygen Saturation during High-risk Cardiac Surgery. *Anesthesiology*. 2016;124(4):826-836.
4. Ogasawara K, Inoue T, Kobayashi M, Fukuda T, Komoribayashi N, Saitoh H, et al. Cognitive impairment associated with intraoperative and postoperative hypoperfusion without neurologic deficits in a patient undergoing carotid endarterectomy. *Surg Neurol*. 2006;65(6):577-580.
5. Zhou ZB, Meng L, Gelb AW, Lee R, Huang WQ. Cerebral ischemia during surgery: an overview. *J Biomed Res*. 2016;30(2):83-87.
6. Lorusso R, Tacco Ne FS, Belliato M, Delnoij T, Zanatta P, Cvetkovic M, et al. Brain monitoring in adult and pediatric ECMO patients: The importance of early and late assessments. *Minerva Anestesiologica*. Edizioni Minerva Medica; 2017;83:1061-1074.
7. Saldien V, Schepens T, Vanlinthout L, Wildemeersch D, Wouters K, Vercauteren M, et al. Real-Time Monitoring of Cerebral Blood Flow and Cerebral Oxygenation During Rapid Ventricular Pacing in Neurovascular Surgery. *J Neurosurg Anesthesiol*. 2020;32(4):354-358.
8. Khozhenko A, Lamperti M, Terracina S, Bilotta F. Can Cerebral Near-infrared Spectroscopy Predict Cerebral Ischemic Events in Neurosurgical Patients? A Narrative Review of the Literature. *J Neurosurg Anesthesiol*. 2019;31(4):378-384.
9. Wang Y, Li L, Wang T, Zhao L, Feng H, Wang Q, et al. The Efficacy of Near-Infrared Spectroscopy Monitoring in Carotid Endarterectomy: A Prospective, Single-Center, Observational Study. *Cell Transplant*. 2019;28(2):170-175.
10. Purdon PL, Sampson A, Pavone KJ, Brown EN. Clinical Electroencephalography for Anesthesiologists. *Anesthesiology*. 2015;123(4):937-960.
11. Pacreu S, Vilà E, Adalid I, Moltó L, Fernández-Candil JL. Density spectral array during the intra and postoperative of a left frontal craniotomy. *Colomb J Anesthesiol*. 2019;47(3):194-197.
12. Dupont G, Burnol L, Jospe R, Raphael T, Auboyer C, Mollieux S, et al. Transcranial Color Duplex Ultrasound. *J Neurosurg Anesthesiol*. 2016;28(2):159-163.
13. Kowalczyk AK, Bachar BJ, Liu H. Neuromonitoring during adult cardiac surgery. *J Biomed Res*. 2016;30(3):171-173.
14. Marinò V, Aloj F, Vargas M, Spinelli G, Pompeo F, Chiacchiari L, et al. Intraoperative neurological monitoring with evoked potentials during carotid endarterectomy versus cooperative patients under general anesthesia technique. *J Neurosurg Anesthesiol*. 2018;30(3):258-264.
15. Yingling YAA-CD. Intraoperative Monitoring of Cranial Nerves in Neurologic Surgery. In: *Cummings Otolaryngology*. Philadelphia: Saunders; 2015.p.2778-93.
16. LanJun Guo AWG. The use of motor evoked potential monitoring during cerebral aneurysm surgery to predict pure motor deficits due to subcortical ischemia. *Clin Neurophysiol*. 2011;648-655.
17. Plourde G. Auditory evoked potentials. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol*. 2006;20(1):129-139.
18. Richards LM, Kazmi SS, Olin KE, Waldron JS, Fox DJ, Dunn AK. Intraoperative multi-exposure speckle imaging of cerebral blood flow. *J Cereb Blood Flow Metab*. 2017;37(9):3097-3109.
19. Tambakis CL, Papadopoulos G, Sergentanis TN, Lagos N, Arnaoutoglou E, Labropoulos N, et al. Cerebral oximetry and stump pressure as indicators for shunting during carotid endarterectomy: Comparative evaluation. *Vascular*. 2011;19(4):187-194.
20. Kearse LA, Brown EN, McPeck K. Somatosensory evoked potentials sensitivity relative to electroencephalography for cerebral ischemia during carotid endarterectomy. *Stroke*. 1992;23(4):498-505.
21. Kawada T, Nakamura S, Nishimura K, Koyama T, Endo S, Kamata S, et al. Continuous monitoring of short-latency somatosensory evoked potentials during cardiac and aortic surgery. *Surg Today*. 1996;26(5):328-332.
22. De Vleeschauwer P, Horsch S, Matamoros R. Monitoring of Somatosensory Evoked Potentials in Carotid Surgery: Results, Usefulness and Limitations of the Method. *Ann Vasc Surg*. 1988;2(1):63-68.
23. Choi HH, Ha EJ, Cho W-S, Kang H-S, Kim JE. Effectiveness and Limitations of Intraoperative Monitoring with Combined Motor and Somatosensory Evoked Potentials During Surgical Clipping of Unruptured Intracranial Aneurysms. *World Neurosurg*. 2017;108:738-747.
24. Thirumala PD, Natarajan P, Thiagarajan K, Crammond DJ, Habeych ME, Chaer RA, et al. Diagnostic accuracy of somatosensory evoked

- potential and electroencephalography during carotid endarterectomy. *Neurol Res.* 2016;38(8):698-705.
25. Jansen C, Moll FL, Vermeulen FEE, van Haelst JMPI, Ackerstaff RGA. Continuous Transcranial Doppler Ultrasonography and Electroencephalography During Carotid Endarterectomy: A Multimodal Monitoring System to Detect Intraoperative Ischemia. *Ann Vasc Surg.* 1993;7(1):95-101.
  26. de Letter J, Sie H, Thomas B, Moll F, Aigra A, Eikelboom B, et al. Near-infrared reflected spectroscopy and electroencephalography during carotid endarterectomy — in search of a new shunt criterion. *Neurol Res.* 1998;20(Sup1):S23-S27.
  27. Mille T, Tachimiri M, Klersy C, Ticozzelli G, Bellinzona G, Blangetti I, et al. Near infrared spectroscopy monitoring during carotid endarterectomy: Which Threshold Value is Critical? *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2004;27(6):646-650.
  28. Moritz S, Kasprzak P, Arlt M, Taeger K, Metz C. Accuracy of cerebral monitoring in detecting cerebral ischemia during carotid endarterectomy. *Anesthesiology.* 2007;107(4):563-569.
  29. Dunn AK. Laser Speckle Contrast Imaging of Cerebral Blood Flow. *Ann Biomed Eng.* 2012;40(2):367-377.
  30. Fielmuth S, Uhlig T. The role of somatosensory evoked potentials in detecting cerebral ischaemia during carotid endarterectomy. *Eur J Anaesthesiol.* 2008;25(8):648-656.
  31. So VC, Poon CCM. Intraoperative neuromonitoring in major vascular surgery. *Br J Anaesth.* 2016;117:ii13-25.
  32. Kashkoush AI, Jankowitz BT, Gardner P, Friedlander RM, Chang Y-F, Crammond DJ, et al. Somatosensory Evoked Potentials During Temporary Arterial Occlusion for Intracranial Aneurysm Surgery: Predictive Value for Perioperative Stroke. *World Neurosurg.* 2017;104:442-451.
  33. Rowed DW, Houlden DA, Burkholder LM, Taylor AB. Comparison of monitoring techniques for intraoperative cerebral ischemia. *Can J Neurol Sci / J Can des Sci Neurol.* 2004;31(3):347-356.
  34. Yun W-S. Cerebral monitoring during carotid endarterectomy by transcranial Doppler ultrasonography. *Ann Surg Treat Res.* 2017;92(2):105.
  35. Kobayashi M, Yoshida K, Kojima D, Oshida S, Fujiwara S, Kubo Y, et al. Impact of external carotid artery occlusion at declamping of the external and common carotid arteries during carotid endarterectomy on development of new postoperative ischemic cerebral lesions. *J Vasc Surg.* 2019;69(2):454-461.
  36. Scheeren TWL, Schober P, Schwarte LA. Monitoring tissue oxygenation by near infrared spectroscopy (NIRS): background and current applications. *J Clin Monit Comput.* 2012;26(4):279-287.
  37. Kirkpatrick PJ, Lam J, Al-Rawi P, Smielewski P, Czosnyka M. Defining thresholds for critical ischemia by using near-infrared spectroscopy in the adult brain. *J Neurosurg.* 1998;89(3):389-394.
  38. Bevan PJW. Should cerebral near-infrared spectroscopy be standard of care in adult cardiac surgery? *Heart Lung Circ.* 2015;24(6):544-550.
  39. Staarmann B, O'Neal K, Magner M, Zuccarello M. Sensitivity and specificity of intraoperative neuromonitoring for identifying safety and duration of temporary aneurysm clipping based on vascular territory, a multimodal strategy. *World Neurosurg.* 2017;100:522-530.