



Revista Científica Estudiantil 2 de Diciembre

RECIBIDO: 2025/06/10

ACEPTADO: 2026/01/03

PUBLICADO: 2026/02/12

EDITORES:

Rolando Javier Álvarez Pérez

EDITOR CORRECTOR:

MSc.Lic. Ismara Zamora León

# Técnicas no invasivas de neuromonitoreo de la presión intracraneal en el traumatismo craneoencefálico.

*Non-invasive techniques for neuromonitoring of intracranial pressure in traumatic cranioencephalic injury.*

**Shania Naranjo Lima**<https://orcid.org/0000-0001-6248-2963>**Yonathan Estrada Rodríguez**<https://orcid.org/0000-0001-9161-6545>**Richard Marcial Gálvez Vila**<https://orcid.org/0009-0000-0829-1357><sup>1</sup> Universidad de Ciencias Médicas de Matanzas. Matanzas, Cuba.

## RESUMEN

Introducción: el trauma craneoencefálico causa la mayor parte de las muertes por traumas a nivel mundial. La mayoría de estos pacientes fallecen antes de llegar al hospital, debido a la hipertensión endocraneana, por lo que el objetivo principal de la monitorización y manejo de la presión intracraneal es influir positivamente en el pronóstico neurológico y optimizar las intervenciones terapéuticas. Objetivo: estructurar los referentes teóricos que sustentan el uso de las técnicas no invasivas de neuromonitoreo de la presión intracraneal en el trauma craneoencefálico. Métodos: para el desarrollo de esta revisión bibliográfica se llevó a cabo una investigación en el período de mayo a noviembre del año 2024. La búsqueda de información se realizó en las bases de datos: SciELO, SCOPUS y PubMed; donde, del total de 58 bibliografías consultadas fueron seleccionadas e incluidas 27 en la revisión, con un 96,3 % correspondiente a los últimos cinco años. Desarrollo: técnicas no invasivas de monitoreo de la presión intracraneal ya evaluadas en la práctica clínica son: la medición del diámetro de la vaina del nervio óptico por ultrasonografía y el Doppler transcraneal. Por otro lado, otras técnicas como la pupilometría cuantitativa podrían ayudar en la detección temprana de elevaciones en la presión intracraneal, pero existen escasos datos disponibles al respecto. Destaca el monitoreo multimodal como una estrategia prometedora, aunque requiere una validación más extensa. Conclusiones: a medida que las tecnologías para monitorear la presión intracraneal se vuelvan más accesibles, se facilitarán la investigación y el diagnóstico clínico, especialmente en unidades de urgencias.

**Palabras clave:** Neuromonitoreo, presión intracraneal, ultrasonografía, traumatismo craneoencefálico

## Abstract

Introduction: traumatic brain injury causes most of the deaths due to trauma worldwide. Most of these patients die before reaching the hospital, due to intracranial hypertension, so the main objective of monitoring and management of intracranial pressure is to positively influence the neurological prognosis and optimize therapeutic interventions. Objective: to structure the theoretical references that support the use of non-invasive

techniques for neuromonitoring intracranial pressure in cranioencephalic trauma. Methods: for the development of this bibliographic review, the research was carried out in the period from May to November 2024. The search for information was carried out in the databases: SciELO, SCOPUS and PubMed, where of the total of 58 bibliographies consulted, 27 were selected and included in the review, with a 96,3 % corresponding to the last five years. Development: non-invasive intracranial pressure monitoring techniques already evaluated in clinical practice are: measurement of optic nerve sheath diameter by ultrasonography and transcranial Doppler. On the other hand, other techniques such as quantitative pupillometry could help in the early detection of elevations in intracranial pressure, but there are few data available in this regard. He highlights multimodal monitoring as a promising strategy, although they require more extensive validation. Conclusions: as technologies for monitoring intracranial pressure become more accessible, research and clinical diagnosis will be facilitated, especially in emergency units.

**Keywords:** Neuromonitoring, ultrasonography, traumatic brain injury, Intracranial hypertension

## Introducción

Se entiende por trauma craneoencefálico (TCE) a la condición médico-quirúrgica que se caracteriza por un daño cerebral como resultado de una lesión traumática en el cráneo, provocado por una fuerza externa que puede ser de tipo: mecánica, química, térmica, eléctrica, radiante o una combinación de estos factores<sup>(1)</sup>. El TCE puede resultar en conmoción, hemorragia o laceración del cerebro, cerebelo y tallo encefálico hasta el nivel de la primera vértebra cervical; las lesiones varían desde una ligera protuberancia en el cráneo hasta el daño cerebral severo<sup>(2)</sup>.

La afección en el sistema nervioso derivada de un TCE es progresiva y variable. Después del golpe inicial, se genera la lesión primaria según el mecanismo y la energía transferida. La reacción inflamatoria posterior es la que causa el daño secundario, que puede empeorar debido a fenómenos de isquemia, disfunción mitocondrial y la inflamación que provoca la alteración del funcionamiento cerebral<sup>(3)</sup>.

Los TCE son responsables de la mayoría de las defunciones ocasionadas por trauma a nivel global. La cifra se sitúa en 579 por cada 100 000 individuos al año, con mayor frecuencia en hombres y asociados a caídas y colisiones de vehículos. En lo que respecta a Latinoamérica, la elevada tasa de incidencia de TCE está relacionada con accidentes de tránsito y actos de violencia<sup>(4)</sup>. En Cuba, constituye la cuarta causa de fallecimientos en personas adultas y la principal entre los menores de 41 años<sup>(5)</sup>. Según el Anuario estadístico de Salud de 2023, las caídas y los accidentes de tráfico fueron responsables de la mayor cantidad de muertes por accidentes, con cifras de 2697 y 814 respectivamente<sup>(6)</sup>.

La mayoría de las personas que sufren un TCE severo mueren antes de ingresar al hospital, y la razón principal de su muerte es la hipertensión endocraneana (HEC). Por ello, el propósito fundamental del neuromonitoreo es controlar y gestionar la presión intracraneal (PIC) a fin de facilitar la identificación oportuna de lesiones cerebrales que puedan surgir como consecuencia del trauma y, de esta forma, mejorar el pronóstico neurológico y optimizar intervenciones terapéuticas<sup>(7)</sup>.

El monitoreo de la PIC desde 1960 utiliza como método estándar la inserción de un catéter intraventricular, que puede estar combinado o no con un sistema de drenaje de líquido cefalorraquídeo (LCR). No obstante, esta técnica conlleva un alto riesgo de infecciones, con una incidencia que varía entre el 3 y el 22 %. Como consecuencia, estos pacientes tienen mayor probabilidad de evolucionar con un coeficiente intelectual disminuido, desarrollar retrasos en el desarrollo de habilidades madurativas, episodios convulsivos y disfunciones valvulares recurrentes, además de otras complicaciones adicionales<sup>(8, 9)</sup>.

Resulta una necesidad inminente la transición hacia enfoques no invasivos para monitoreo de la PIC que permitan evaluar daños cerebrales y que, a su vez, ofrezcan una predicción más fiable del riesgo de HEC. Por esta razón, los autores de esta revisión se proponen como objetivo: sintetizar los referentes teóricos que justifican la aplicación de métodos no invasivos de neuromonitoreo de la presión intracraneal en el trauma craneoencefálico.

## Métodos

Para el desarrollo de esta revisión narrativa con enfoque descriptivo se llevó a cabo una investigación en el período de mayo a noviembre de 2024. La búsqueda de información se realizó en las bases de datos: SciELO, SCOPUS y PubMed; se emplearon los términos: “traumatismo craneoencefálico”, “hipertensión endocraneana”, “neuromonitoreo”, “medición por ultrasonografía de la vaina del nervio óptico” y “ecografía Doppler”, así como sus traducciones al inglés, utilizando los operadores “y” (AND) y “o” (OR).

Se seleccionaron artículos científicos publicados en inglés o español durante los últimos cinco años. Para la inclusión final se aplicó un filtro centrado en la solidez teórica y metodológica de las investigaciones dada por una clara coherencia interna entre sus objetivos, su diseño metodológico y sus conclusiones. Se priorizaron, asimismo, las fuentes que, además de presentar transparencia en sus procedimientos de análisis, ofrecieran una contribución pertinente al eje temático de esta revisión; por lo que, del total de 58 bibliografías consultadas, finalmente fueron seleccionadas e incluidas 27 en la revisión. Se confeccionó el presente informe mediante el método teórico de análisis-síntesis.

## Desarrollo

La doctrina de Monro-Kelly sugiere que el cráneo es un estuche inextensible que contiene tres volúmenes distintos; en promedio, el cerebro adulto ocupa 1400 ml (80 %), y el volumen de sangre y LCR se mantiene en igual proporción, para 150 ml (10 %) cada uno. La PIC se define por el equilibrio entre estos volúmenes<sup>(10)</sup>. Se ha comprobado que el funcionamiento cerebral se da con valores de PIC que oscilan entre 10 y 15 mmHg en adultos, de 3 a 7 mmHg en niños y de 1,5 a 6 mmHg en neonatos<sup>(11)</sup>.

Si alguno de los volúmenes que componen la bóveda craneal sufre un aumento brusco, en la fase inicial se evita el aumento de la PIC desplazando LCR a la cisterna lumbar y, en menor cantidad, sangre a venas yugulares extracraneales. Cuando este mecanismo falla, pequeños cambios de volumen condicionan grandes modificaciones en la PIC<sup>(8)</sup>.

En una lesión por TCE el contenido del encéfalo puede expandirse y en consecuencia se elevará la PIC; entonces, la presión que ejerce el LCR dentro de los ventrículos al extenderse hasta los compartimentos craneales cerrados produce un desplazamiento del parénquima cerebral a través de las estructuras rígidas que los delimitan, ocasionando una hernia del tejido cerebral y produciéndose entonces la lesión cerebral, por compresión y tracción de las estructuras implicadas o por isquemia debido a compromiso de los elementos vasculares.<sup>(10)</sup>

Por tanto, en las primeras horas posteriores al trauma la expansión de hematomas es la principal causa de elevación de la PIC. Otros mecanismos incluyen la acumulación de agua, expansión de contusiones, pérdida de autorregulación e isquemia. El aumento de la PIC puede llegar a reducir la presión de perfusión cerebral (PPC), que fisiológicamente se encuentra entre 50-150 mmHg, pues esta es equivalente a presión arterial media (PAM)-PIC. Una reducción en la PPC inferior a 50 mmHg conlleva a isquemia y promueve la aparición de edema citotóxico, y resulta en presiones intracraneales aún más elevadas, llevando así al paciente a un posible coma o muerte.<sup>(1, 10)</sup>

## Diagnóstico

Para la evaluación inicial de un TCE se debe utilizar la Escala de Coma de Glasgow (GCS por sus siglas en inglés: Glasgow Coma Scale), que evalúa el nivel de conciencia de una persona de una manera simple, objetiva y rápida. En la GCS se clasifica como grave a todo trauma cuya puntuación, basándose en apertura ocular, respuesta verbal y actividad motora, esté comprendida entre los 3 y 8 puntos; además, el paciente se encuentra en estado comatoso y padece de lesiones neurológicas significativas<sup>(1)</sup>.

**Tabla 1. Escala de Coma de Glasgow.**

APERTURA OCULAR	
Espontánea	4
A estímulo verbal	3
A estímulo doloroso	2
Sin respuesta	1
RESPUESTA VERBAL	
Paciente orientado	5
Paciente confundido	4
Palabras inadecuadas	3
Sonidos incomprensibles	2
Sin respuesta	1
RESPUESTA MOTORA	
Obedece órdenes	6
Localiza el dolor	5
Retirada al dolor	4
Flexión anormal (decorticación)	3
Extensión anormal (descerebración)	2
Sin respuesta	1

*Fuente: Elaboración propia.*

Se deben realizar estudios de neuroimagen como la tomografía computarizada (TC); examen de elección para el diagnóstico, pronóstico, control evolutivo de las lesiones en el TCE y de la respuesta al tratamiento, con una estrecha relación con la mortalidad. Para clasificar las lesiones en la TC, se creó la escala de Marshall<sup>(12)</sup>.

**Tabla 2. Escala de Marshall.**

LESIÓN DIFUSA	
Categoría	Descripción
I	Sin anomalías intracraneales visibles.
II	Cisternas basales: presentes. Línea media: desplazamiento de 0 a 5 mm. Lesión: ausencia de lesión > 25 ml o lesión densa presente. Presencia o ausencia de fragmentos óseos o cuerpos extraños.

LESIÓN DIFUSA	
III	Cisternas basales: comprimidas o ausentes. Línea media: desplazamiento de 0 a 5 mm. Lesión: ausencia de lesión hiperdensa o de densidad mixta > 25 ml.
IV	Línea media: desplazamiento > 5 mm. Lesión: ausencia de lesión hiperdensa o mixta > 25 ml.
LESIÓN FOCAL	
Lesión evacuable	Cualquier lesión quirúrgicamente evacuable.
Lesión no evacuable	Lesión hiperdensa o de densidad mixta > 25 ml, no evacuable quirúrgicamente.

Fuente: Marshall L, Bowers S, Klauber M, Clark MvB, Eisenberg HM, Jane JA et al. 13

La resonancia magnética (RM) no se recomienda como imagen inicial de elección, pero se reserva para detectar lesiones específicas que pueden no ser evidentes en la TC y que, si están presentes, podrían explicar un estado de conciencia alterado persistentemente como en la lesión axonal difusa. Las secuencias de RM que son especialmente útiles en el TCE son T1, T2, T2 con recuperación de inversión atenuada por líquido (FLAIR), imágenes de difusión (DWI) e imágenes ECHO de gradiente ponderado en T2 (GRE)<sup>(14)</sup>.

Es recomendable monitorizar la PIC en todos los pacientes con TCE grave y TAC patológico; y a los pacientes con TCE grave y TAC normal que tengan dos o más de las siguientes características: edad  $\geq$  40 años, respuestas motoras francamente anormales (menos de 4 puntos en la GCS) y tensión arterial  $\leq$  90 mmHg en algún momento de su evolución<sup>(1)</sup>.

## Técnicas de neuromonitoreo de la presión intracraneal

Para monitorear la PIC existen métodos invasivos y no invasivos. Entre los métodos invasivos están las derivaciones ventriculares externas y los catéteres para medición que se colocan directamente en el parénquima cerebral. De los métodos no invasivos existen la medición por ultrasonografía Doppler de los índices de pulsatilidad de las arterias cerebrales y la medición por ultrasonido de la vaina del nervio óptico<sup>(8)</sup>.

La ecografía gana cada vez más espacio en las especialidades quirúrgicas gracias a su disponibilidad al pie de la cama, su buena reproducibilidad, y al hecho de que es más económica e inocua comparada con las técnicas invasivas. La determinación del diámetro de la vaina del nervio óptico por ultrasonografía (DVNO) ha cobrado auge en el monitoreo de la PIC en el enfermo neurológico grave; más cuando no existe disponibilidad de recursos<sup>(15)</sup>.

El nervio óptico está rodeado por las capas meníngeas en forma de vaina y el LCR fluye libremente entre el espacio subaracnoideo intracraneal e infraorbitario, los cuales experimentan los mismos cambios de presión; por lo que, en condiciones de incremento de la PIC, aumenta el diámetro de la vaina<sup>(16)</sup>.

La técnica habitual se realiza con un transductor lineal con onda de 5-10 MHz colocado sobre la porción temporal del párpado superior cerrado sin hacer presión sobre el globo ocular. De esta manera, la parte retrobulbar del nervio óptico se puede visualizar en un plano axial que muestra la papila y el nervio óptico en su recorrido longitudinal. Se distingue la porción correspondiente a la retina, de donde parte una zona hipoeoica que corresponde a la vaina del nervio óptico. Esta debe ser medida a una distancia de 0.3 mm debajo de la papila; a ese nivel, se mide perpendicularmente la distancia de borde a borde del área

hiperecogénica alrededor del nervio óptico, teniendo como límite superior 0.5 mm que se corresponden con una PIC de 15 mmHg; los valores por encima de este se consideran anormales<sup>(15, 16, 17)</sup>.

Los cambios en el diámetro de la vaina del nervio óptico como reflejo del aumento de la PIC representan el concepto anatómico que explica el papiledema. La HEC frecuentemente produce congestión venosa retiniana, con dilatación capilar y edema extracelular, y en estados más avanzados se produce una elevación del disco óptico por edema y posteriormente hemorragias retinianas<sup>(18)</sup>.

El umbral del DVNO utilizado para determinar el aumento de la PIC por encima de 20 mmHg es diverso y no existe un consenso definido entre investigadores.<sup>17</sup> Con relación al complejo nervio óptico-vaina algunos autores plantean que su estimación ecográfica tiene una sensibilidad y especificidad, para la detección de HEC, de 88 y 93 % respectivamente, demostrando una correlación más estrecha en el TCE, aunque también se ha reportado utilidad en casos con HEC de etiología no traumática. Sin embargo, se demostró que un diámetro del complejo nervio óptico-vaina superior a 5.5 mm en pacientes con trauma craneal se correlaciona con PIC mayor a 20 mmHg, para una sensibilidad del 100 %<sup>(18)</sup>.

Las desventajas de la medición del DVNO por ultrasonografía se relacionan principalmente con la necesidad de adquirir competencia en la técnica para optimizar la precisión, el riesgo potencial de daño por presión en el globo si la técnica es pobre y el daño potencial resultante de los efectos térmicos y no térmicos de ultrasonido. Otras consideraciones en contra de la utilidad de la técnica versan sobre su uso cuando existen fluctuaciones agudas la PIC, ya que en cortos periodos de tiempo sus modificaciones no logran el equilibrio con la presión del LCR dentro de la vaina del nervio óptico por lo que el DVNO no se correlaciona con el rápido descenso de los niveles de la PIC<sup>(17)</sup>.

Autores como Rojas Murillo, et al. compararon el diámetro de la vaina del nervio óptico, medido por ultrasonografía (USG) y TC en pacientes con HEC, y obtuvieron como resultado una correlación positiva entre estos dos exámenes. La mediana del DVNO determinada en el grupo de pacientes de su estudio fue de 6,9 mm<sup>(16)</sup>. No obstante, Zamora Cueva y Vázquez Tirado encontraron en su estudio un punto de corte de 6,05 mm para el DVNO, medido por USG como diagnóstico indirecto de HEC<sup>(10)</sup>. Este valor se encuentra influenciado por factores como la variación anatómica que sufre el nervio óptico, peso, edad y sexo.

El Doppler transcraneal (DTC) permite evaluar la velocidad del flujo sanguíneo en las arterias que conforman el polígono de Willis basándose en el efecto Doppler y en que las ondas de ultrasonido emitidas por la sonda del DTC son reflejadas por los eritrocitos en movimiento en los vasos sanguíneos y de esta forma es posible obtener parámetros de flujo sanguíneo cerebral. La diferencia entre las frecuencias emitidas y reflejadas se denomina desplazamiento Doppler. Cuanto mayor sea el desplazamiento Doppler, mayor será la velocidad del flujo sanguíneo en el vaso insonado que se podrá medir mediante análisis espectral<sup>(20)</sup>.

El examen DTC se realiza con ondas de ultrasonido de baja frecuencia (2 MHz) debido a que las sondas de alta frecuencia, que generalmente se usan para estudios Doppler extracraneales, no pueden penetrar el cráneo. Además, solo se puede realizar en puntos de referencia anatómicos específicos donde el cráneo más delgado o los forámenes naturales permiten una mejor penetración de las ondas de ultrasonido. Estas áreas se denominan ventanas acústicas. Hay cuatro ventanas acústicas que se pueden emplear para la monitorización en el DTC: transtemporal, transorbitaria, suboccipital y submandibular<sup>(21)</sup>.

Hay dos tipos de dispositivos Doppler transcraneales que se utilizan para identificar qué arterias se están insonando en ventanas acústicas específicas: DTC no dúplex (sin imagen) y dúplex (con imagen). Cuando se utilizan DTC no dúplex, las arterias se identifican en función de diferentes factores, como la

ventana acústica utilizada, la profundidad de insonación, la orientación del transductor, la dirección del flujo sanguíneo y las velocidades de flujo medidas. Por el contrario, en el uso de DTC dúplex se combinan todos estos factores con una vista transversal del área insonada, lo que permite visualizar diferentes estructuras anatómicas y vasos sanguíneos específicos<sup>(20)</sup>.

El examen DTC depende en gran medida del operador. Uno de los factores técnicos esenciales es mantener siempre el ángulo de insonación relativo a la dirección del transductor menor a 30 grados, ya que esto minimiza los errores en los cálculos de la velocidad del flujo. La falta de buenas ventanas acústicas también puede ser un desafío, especialmente para las mujeres mayores. Casi el 10 % de la población general no dispone de ventanas acústicas<sup>(22)</sup>.

En el caso de la monitorización de la arteria cerebral media (ACM), esta se relaciona con una condición única en la mayoría de los humanos, ya que el trayecto de la ACM va directamente hacia el transductor, mientras se use la ventana temporal con un ángulo de 30 grados<sup>(17)</sup>. La monitorización de la ACM se puede repetir evolutivamente sin constituir un método invasivo; ventaja que algunos autores consideran más práctica que la TAC<sup>(23)</sup>.

Como se ha mencionado anteriormente, la PPC se define como el gradiente de presión a través del lecho vascular cerebral y resulta de PAM-PIC; por tanto, al elevarse la PIC, esta se ve reducida. Bellner, et al. estimaron la PIC a partir de la determinación del índice de pulsatilidad (IP) en la ACM mediante la siguiente fórmula:  $PIC = 10,93 \times IP - 1,28$ . El IP se deriva de los cálculos obtenidos de la velocidad sistólica (VS), velocidad diastólica (VD) y velocidad media (VM) del vaso en que se practique la insonación<sup>(23)</sup>.

La alta pulsatilidad (IP de 1.2-1.6) se asocia con HEC moderada; una muy alta pulsatilidad (IP de 1.7-3) indica HEC intensa; y valores de IP > 3 se correlacionan estrictamente con PIC y asistolia cerebral.<sup>17</sup> Por tanto, los valores obtenidos en la monitorización de la ACM a través del DTC permiten estimar la PIC y conocer la repercusión de las medidas terapéuticas utilizadas en el tratamiento de la HEC<sup>(17)</sup>.

La pupilometría cuantitativa utiliza un software de análisis de imágenes para medir con precisión el tamaño pupilar en reposo utilizando luz infrarroja, la velocidad de constricción después de la exposición a la luz visible, el tamaño final después de la constricción máxima y la velocidad de relajación. Una reducción en la actividad parasimpática del nervio oculomotor como resultado de lesiones compresivas o PIC elevada puede resultar en un deterioro sutil de la reactividad pupilar que no se puede dilucidar fácilmente mediante pruebas manuales<sup>(24)</sup>.

En pacientes con TCE grave y lesiones intracraneales anormales en la TC con riesgo de hipertensión intracraneal secundaria, la PIC elevada sostenida se asocia con un índice pupilar alterado. Un índice de pupila neurológica (NPI) < 3.0 representa una pupila lenta, mientras que un NPI de 0 denota no reactividad. Jahns, et al. observaron la disminución consistente del NPI con mayor frecuencia en pacientes con PIC refractaria y lo asociaron con un peor resultado a los 6 meses. Por el contrario, Stevens et al encontraron una relación débil entre la medición inicial del NPI y los episodios posteriores de aumento de PIC<sup>(25)</sup>.

En comparación con otras técnicas no invasivas, para la pupilometría no se requiere un ecografista experto, y las evaluaciones frecuentes pueden ser realizadas en la cabecera del paciente utilizando un pequeño dispositivo de mano, el pupilómetro. A pesar de las ventajas, solo hay un cuerpo limitado de evidencias que confirma la precisión diagnóstica de esta herramienta. Aun así, los autores de este estudio consideran razonable integrar esta herramienta en la práctica clínica para la detección no invasiva de la elevación de la PIC potencialmente mortal<sup>(24)</sup>.

La NIRS (near infrared spectroscopy) es una técnica no invasiva de oximetría cerebral que proporciona una evaluación global de la oxigenación de la hemoglobina en todos los compartimentos vasculares (arteriales, venosos y capilares) mediante haces de luz cercanos a los infrarrojos en la piel de la línea media frontal (región ACM y anterior)<sup>(26)</sup>.

Consta de dos detectores que permiten discriminar hueso y partes blandas de tejido cerebral. La intensidad de la luz que recibe cada uno de ellos se convierte en una señal eléctrica que se procesa y digitaliza, obteniendo valores de saturación de los dos hemisferios cerebrales actualizados cada cuatro segundos. El valor normal oscila entre 60 y 80 %<sup>(3)</sup>.

La principal ventaja de NIRS es su carácter no invasivo, su facilidad de uso y la capacidad de proporcionar una monitorización en tiempo real sin necesidad de sedación o transporte del paciente. Sin embargo, sus limitaciones incluyen la contaminación extracraneal (como el flujo sanguíneo del cuero cabelludo y el cráneo), la profundidad de penetración limitada y la variabilidad en las lecturas según la anatomía individual y la ubicación de la sonda<sup>(27)</sup>.

Si bien los valores de oxigenación cerebral no han demostrado ser útiles en varios estudios en TCE, con resultados decepcionantes, las tendencias y la variación a lo largo del tiempo pueden ayudar a los médicos a controlar la saturación de oxígeno cerebral e indirectamente la perfusión cerebral. También se ha propuesto como un método para medir la autorregulación cerebral (que mantiene una perfusión cerebral constante) utilizando el índice de oximetría, especialmente en situaciones en las que no se utiliza la monitorización invasiva<sup>(26)</sup>.

La integración del monitoreo multimodal (MMM) en la unidad de cuidados intensivos representa un avance significativo en el seguimiento de los pacientes neurocríticos. El MMM utiliza datos completos obtenidos de varias modalidades de monitoreo, como oximetría cerebral, electroencefalograma y oxigenación del tejido cerebral, para mejorar la atención al paciente a través de análisis predictivos con algoritmos de aprendizaje automático que pueden analizar conjuntos de datos vastos y complejos identificando patrones y correlaciones que pueden ser imperceptibles para el análisis humano<sup>(27)</sup>.

Este enfoque permite la predicción de eventos críticos, como lesiones cerebrales secundarias, isquemia cerebral o convulsiones inminentes, mucho antes de que se hagan clínicamente evidentes. Algoritmos como las redes neuronales, las máquinas de vectores de soporte y los árboles de decisión se han utilizado para predecir los resultados y guiar las intervenciones terapéuticas<sup>(27)</sup>.

Uno de los usos más estudiados de la inteligencia artificial (IA) en los cuidados intensivos de los pacientes con TCE ha sido la monitorización de la PIC, y más concretamente la predicción de la HEC.<sup>14</sup> Sin embargo, los avances de la IA en el TCE deben tomarse con cautela; aunque los datos al respecto son alentadores en términos de estimaciones estadísticas, hasta ahora no han demostrado una superioridad tangible sobre estudios con base clínica, que podrían extrapolarse fácilmente a la práctica y, al mismo tiempo, ser una herramienta rentable para los países de ingresos bajos y medios<sup>(14)</sup>.

Ninguna tecnología no invasiva actual puede reemplazar la monitorización invasiva de la PIC. Sin embargo, cuando no se dispone de una monitorización invasiva, puede ser útil la evaluación multimodal con técnicas no invasivas. Se requiere más innovación e investigación para desarrollar una técnica confiable y continua de evaluación no invasiva de la PIC<sup>(24)</sup>.

## Conclusiones

El TCE constituye un problema de salud pública de primer orden debido a la elevada morbimortalidad que conlleva. Entre las complicaciones más prevalentes de esta entidad se encuentra la HEC. En este

contexto, se prevé que, a medida que las tecnologías para el monitoreo de la PIC sean más accesibles y económicas, la investigación y el diagnóstico clínico de esta complicación resultará más factible y oportuna. Es importante señalar que las técnicas no invasivas descritas no pretenden sustituir al monitoreo invasivo de la PIC cuando este se encuentre indicado por un profesional calificado. Sin embargo, resulta necesario reconocer su utilidad como herramientas complementarias en la evaluación del TCE en los servicios de urgencias.

## Aporte científico

Las técnicas no invasivas de neuromonitoreo de la PIC deben implementarse con mayor frecuencia en la atención a los pacientes neurocríticos. La rápida curva de aprendizaje, la amplia disponibilidad, la rapidez de su realización, su bajo costo y la factibilidad de realizarla sin movilizar al paciente brindan más información para planificar un tratamiento de mayor efectividad que en aquellos diagnósticos guiados sólo por la evaluación clínica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) León JS, Rolanly Robles J, Jaimes Hernández LX, Ramírez Zambrano CJ, Solano Díaz LC, Guerrero Moreno JS, Santander Díaz YF. Revisión del manejo del trauma craneoencefálico en urgencias. *Ciencia Latina* [Internet]. 2022 [citado: 10/12/2024];6(3):655-6. Disponible en: <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/2251>
- (2) Ginarte MJ, Pérez-Ortiz L, Vitón Castillo AA. Scientific production on crania-encephalic trauma in Cuban student journals. January 2015-June 2021. *Rev.Med.Electrón.* [Internet]. 2023 [citado: 10/12/2024]; 45(1): 112-123. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1684-18242023000100112&lng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1684-18242023000100112&lng=es).
- (3) Jordán E, Fuentes Esteban D, Casado Pellejero J, Nebra Puertas A. Update in management of intracranial hypertension after traumatic brain injury. *Sanid. Mil.* [Internet]. 2023 [citado: 10/12/2024];79(1): 52-60. Disponible en: [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1887-85712023000100012&lng=es](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1887-85712023000100012&lng=es)
- (4) González Y, Rodríguez García C, González Cabrera Y, Llanes Pulido D. Mortalidad por traumatismo craneoencefálico, aspectos médico-legales. *Acta Méd Centro* [Internet]. 2024 [citado: 10/12/2024]; 18 (2). Disponible en: <https://revactamedicacentro.sld.cu/index.php/amc/article/view/1899>
- (5) Carballo JA, Sarmiento Ardebol NR, Fernández Sarmiento DM, Hernández Velazquez FM. Traumatismo craneoencefálico de pacientes pediátricos en una unidad de cuidados intensivos / Traumatic brain injury in pediatric patients admitted to an intensive care unit. *Arch Hosp Univ "Gen Calixto García"* [Internet]. 2022 [citado: 10/12/2024]; 10 (1). Disponible en: <https://revcalixto.sld.cu/index.php/ahcg/article/view/906>
- (6) Ministerio de Salud Pública (MINSAP). Anuario Estadístico de Salud 2023 [Internet]. La Habana: MINSAP. Dirección Nacional de Estadísticas de Salud; 2024 [citado: 10/12/2024]. Disponible en: <https://temas.sld.cu/estadisticassalud/2024/09/30/anuario-estadistico-de-salud-2023/>
- (7) Ocañas CE, Albores Ibarra N. Estado actual y perspectivas futuras en el manejo de la hipertensión intracraneal posterior a traumatismo craneoencefálico: craniectomía descompresiva, hipotermia terapéutica y barbitúricos. *Neurology* [Internet]. 2023 [citado: 10/12/2024]; 38(5):357-363. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.nrl.2020.08.007>
- (8) Ávila RE, Coria Ladrón de Guevara VL, Montelongo FJ, Reyes Pérez MM, Carmona Domínguez A, Suárez Suárez A. Medición del diámetro de la vaina del nervio óptico por ultrasonografía versus tomografía simple de cráneo en pacientes con trauma craneoencefálico. *Med. crít.* [Internet]. 2020 [citado: 10/12/2024];34(4):221-230. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2448-89092020000400221&lng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-89092020000400221&lng=es)
- (9) A, Argañaraz R, Epelbaum C, Sanchez M, Mantese B. Infecciones asociadas a drenaje ventricular al exterior: incidencia y factores de riesgo. *Rev. Argent. Neuroc.* [Internet]. 2020 [citado: 10/12/2024]; 1(Sup1):11-15. Disponible en: <https://ranc.com.ar/index.php/revista/article/view/160>
- (10) Carpio L, Vargas Mena R, Hidalgo Azofeifa S. Fisiopatología del síndrome de hipertensión intracraneal. *Rev Med Sin.* [Internet]. 2021 [citado: 11/12/2024]; 6(10):e719. Disponible en: <https://doi.org/10.31434/rms.v6i10.719>
- (11) Pérez D, Lacerda Gallardo AJ. Características anatómicas y fisiológicas que influyen en la presión intracraneal y la presión de perfusión cerebral en el paciente pediátrico con traumatismo craneoencefálico grave. *Med. clín. soc.* [Internet]. 2021 [citado: 11/12/2024]; 5(1):44-49. Disponible en: [http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2521-22812021000100044&lng=es](http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2521-22812021000100044&lng=es)

- (12) Pérez D, Lacerda Gallardo A. Contribución de los hallazgos tomográficos al diagnóstico de la hipertensión intracraneal en el traumatismo craneoencefálico grave. *Rev Cubana Pediatr* [Internet]. 2022 [citado: 11/12/2024];94(4). Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-75312022000400005&lng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75312022000400005&lng=es).
- (13) L, Bowers S, Klauber M, Clark MvB, Eisenberg HM, Jane JA et al. A new classification of head injury based on computerized tomography. *J Neurosurg*. 1991. 75(Supplement), S14-S20. Disponible en: <https://doi.org/10.3171/sup.1991.75.1s.0s14>
- (14) Reyes MJ, Villegas Trujillo LM, Cespedes J, Velásquez Vera M, Rubiano AM. Usefulness of Artificial Intelligence in Traumatic Brain Injury: A Bibliometric Analysis and Mini-review. *World Neurosurg*. [Internet]. 2024 [citado: 11/12/2024]; 188:83-92. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38759786/>
- (15) Rodríguez Y, Arias Manganelly JM. Diámetro de la vaina del nervio óptico como diagnóstico indirecto de hipertensión intracraneal traumática. *Rev. electron. Zoilo* [Internet]. 2024 [citado: 11/12/2024]; 49 (1). Disponible en: <https://revzoilomarinaldo.sld.cu/index.php/zmv/article/view/3678>
- (16) Murillo T, Olvera González N. Relación entre la medición por tomografía y ecografía del diámetro de la vaina del nervio óptico como estimador no invasivo de la presión intracraneal. *Cir. cir.* [Internet]. 2022 [citado: 12/12/2024];90(2):236-241. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2444-054X2022000200236&lng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2444-054X2022000200236&lng=es).
- (17) Remón A, Jerez Álvarez AE, Remón Chávez CE. Ultrasonografía del diámetro de la vaina del nervio óptico en el monitoreo de la presión intracraneal. *Rev cuba anestesiol reanim* [Internet]. 2021 [citado: 12/12/2024];20(3):e710. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1726-67182021000300008&lng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-67182021000300008&lng=es).
- (18) González E, Solís Alfonso L. Mensuración ecográfica del complejo nervio óptico-vaina en la hipertensión intracraneal. *Revista Cubana de Oftalmología* [Internet]. 2022 [citado: 12/12/2024]; 35(2):[aprox. 0 p.]. Disponible en: <https://revoftalmologia.sld.cu/index.php/oftalmologia/article/view/1494>
- (19) Cueva R, Vásquez-Tirado G. Validez del diámetro de la vaina del nervio óptico por ultrasonografía para el diagnóstico de hipertensión intracraneal en traumatismo craneoencefálico severo. *Rev. Cuerpo Med. HNAAA* [Internet]. 2021 [citado: 12/12/2024]; 14(2): 139-144. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.35434/rcmhnaaa.2021.142.1029>.
- (20) R, Tsikvadze M, Peel J, Howard L, Kapoor N, Freeman WD. Multimodal monitoring: practical recommendations (dos and don'ts) in challenging situations and uncertainty. *Front Neurol* [Internet]. 2023 [citado: 12/12/2024]; 14:1135406. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10188941/>
- (21) Y, Wan W, Xiang M, Guan Y. Transcranial Doppler ultrasonography as a diagnostic tool for cerebrovascular disorders. *Front Hum Neurosci* [Internet]. 2022 [citado: 13/12/2024]; 16:841809. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35572008/>
- (22) MA. Transcranial Doppler ultrasound in neurovascular diseases: diagnostic and therapeutic aspects. *J Neurochem*. [Internet]. 2022 [citado: 13/12/2024];123(Suppl.2):39–51. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23050641/>
- (23) Assa AR, Abdo Cuza A, de la Cruz de la Cruz HR. Ecografía Doppler transcraneal para estimar la presión intracraneal y presión de perfusión cerebral en pacientes pediátricos neurocríticos. *Rev Cubana Pediatr* [Internet]. 2022 [citado: 13/12/2024]; 94(2). Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-75312022000200021&lng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75312022000200021&lng=es).
- (24) V. Noninvasive Intracranial Pressure Monitoring: Are We There Yet? *Neurocrit Care* [Internet]. 2024 [citado: 13/12/2024]; 41(2):332-338. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11377479/#notes2>
- (25) P, Taccone FS, Sourd D, Privitera C, Bosson JL, Teixeira TL et al. Prediction of neurocritical care intensity through automated infrared pupillometry and transcranial doppler in blunt traumatic brain injury: the NOPE study. *Eur J Trauma Emerg Surg* [Internet]. 2024 [citado: 13/12/2024]; 50(4):1209-1217. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11458749/#Sec13>
- (26) S, Abecasis F, Jalloh I. Neuromonitoring in Children with Traumatic Brain Injury. *Neurocrit Care* [Internet]. 2024 [citado: 13/12/2024];40(1):147-158. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10861621/>
- (27) BS. Future of neurocritical care: Integrating neurophysics, multimodal monitoring, and machine learning. *World J Crit Care Med* [Internet]. 2024 [citado: 13/12/2024]; 13(2):91397. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11155497/#sec24>

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

**SNL:** conceptualización, curación de datos, investigación, metodología, administración del proyecto, supervisión, validación, redacción del borrador original, redacción, revisión y edición.

**YER:** investigación, metodología, redacción del borrador original, redacción, supervisión, revisión y edición.

**RMGV:** investigación, metodología, revisión y edición.

## CONFLICTOS DE INTERÉS

---

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

## FINANCIAMIENTO

---

Los autores no recibieron financiación para el desarrollo del presente artículo.



Este artículo está publicado bajo la licencia **Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)**. Se permite su reproducción, distribución y adaptación siempre que se cite correctamente la fuente original.