



El síndrome compartimental intracraneal: un modelo propuesto para la monitorización y el tratamiento de la lesión cerebral aguda

Josè Yair Santos Moreira¹ <https://org/0009-0004-1783-544X>

Daniel Amaya Villegas¹

Lisdianis Rosa Rosasbal¹ <https://orcid.org/0009-0006-9577-5977>

¹ Residente de Medicina Intensiva y Emergencias. Hospital Docente Clínico Quirúrgico "Dr. Miguel Enríquez". Universidad de Ciencias Médicas de La Habana. La Habana, Cuba.

Correspondencia: jairsantos21@gmail.com

Resumen

Introducción: durante años, la evaluación y el manejo de la hipertensión intracraneal, con base en umbrales específicos, han sido el objetivo principal ("punta del iceberg") para el tratamiento de la lesión cerebral aguda, especialmente para la lesión cerebral traumática. **Material y Método:** esta investigación constituye una revisión bibliográfica que proporciona información relevante para la comunidad científica y la práctica clínica. Se realizó la búsqueda de información en las bases de datos de SciELO, Dialnet, PubMed y Scopus en el mes de diciembre de 2024. **Objetivo:** investigar el síndrome compartimental intracraneal: un modelo propuesto para la monitorización y el tratamiento de la lesión cerebral aguda. **Desarrollo:** el síndrome compartimental intracraneal es un modelo de diagnóstico de deterioro de la compliance intracraneal que aplica diferentes técnicas de monitoreo con fines educativos como un estándar de atención. En cuanto al hipertensión intracraneal, el síndrome compartimental intracraneal ocurre porque el cráneo es un compartimento no extensible con una adaptación limitada a los cambios de presión, y cuando el volumen interno alcanza un nivel crítico, la compliance intracraneal se agota. **Conclusiones:** Se necesitan estudios a gran escala para evaluar este modelo propuesto además de validar el uso de nuevas técnicas de monitorización no invasivas para comprender estos nuevos conceptos. Abogamos por mudarnos hacia nuevos conceptos y cambios de paradigma para disminuir la mortalidad y la discapacidad asociado con un retraso en el proceso de toma de decisiones.

Palabras clave: Compliance intracraneal; Síndrome compartimental intracraneal; Hipertensión intracraneal.

Abstract

Introduction: the use of computer media has undergone astonishing progress in recent years and is therefore an indicator of the level of integration, usefulness and the exceptional role played by computers in the contemporary world and in particular in the medical sphere. **Material and Method:** this research constitutes



a literature review that provides relevant information for the scientific community and clinical practice. The search for information was carried out in the SciELO, Dialnet, PubMed and Scopus databases in March 2024.

Objective: to investigate how Artificial Intelligence and telemedicine can help improve the quality of patient care. **Development:** the biological basis of AI is in the Central Nervous System (CNS). Expert or knowledge-based systems, typical of the AI field, are nothing more than computer programs that simulate the chains of reasoning that an expert performs to solve a problem in his or her domain. Anonymisation is the process of eliminating or minimising the risks of re-identification of an individual from his or her personal data by removing any direct or indirect reference to his or her identity. **Conclusions:** The range of applications of AI and AI-mediated technologies in Medicine and Health is huge and rapidly growing, with many powerful potential outcomes, which can affect humans and society at all scales.

Keywords: Artificial Intelligence; Medical informatics; Medicine; Ethics.

INTRODUCCIÓN

Durante años, la evaluación y el manejo de la hipertensión intracraneal (HI), con base en umbrales específicos, han sido el objetivo principal ("punta del iceberg") para el tratamiento de la lesión cerebral aguda (LCA), especialmente para la lesión cerebral traumática (LCT). El aumento de la presión intracraneal (PIC) genera efectos deletéreos debido al desplazamiento de estructuras anatómicas, llevando a una cascada de edema cerebral, isquemia y generando diferentes grados y tipos de herniación del tejido cerebral.¹

Recientemente, un panel de expertos desarrolló algoritmos de manejo para el cuidado del TCE basados en 22 mmHg para el umbral de PIC. No obstante, tales recomendaciones solo están respaldadas por niveles de evidencia más bajos.¹ De hecho, el único ensayo controlado aleatorizado para el manejo del TCE que compara la monitorización de la PIC frente a un protocolo clínico guiado por el examen y la neuroimagen (ensayo Best-Trip) demostró que la monitorización de la PIC no era una intervención necesaria cuando se tomaban exámenes neurológicos seriados junto a la cama e imágenes cerebrales. Este estudio cambió el paradigma con respecto a la consideración de la PIC como una intervención central aislada en el TCE. Además, condujo al surgimiento de argumentos que abogaban contra el mantenimiento de un punto de corte de PIC empírico, fijo y rígido como pilar para iniciar diferentes intervenciones médicas y/o quirúrgicas.

Los recientes avances en tecnología han traído a las unidades de cuidados intensivos la oportunidad de monitorear de cerca y predecir las consecuencias no deseadas del deterioro de la CCI, con un potencial diagnóstico sinérgico cuando se combinan estas técnicas.¹ Por lo tanto, el manejo moderno de la HI debe centrarse en una perspectiva diferente y más integrada, considerando los instrumentos disponibles para monitorear estos fenómenos.

La presente revisión de perspectiva tiene como objetivo proponer la integración de las técnicas de monitoreo actualmente disponibles para evaluar el deterioro del CCI, como el monitoreo de la PIC, el Doppler transcraneal (DTC), la pupilometría, la oximetría cerebral, la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS), la ecografía del diámetro de la vaina del nervio óptico (ONSD) y el análisis automatizado de la forma de onda de la PIC (ICPW). Con estas herramientas a mano, proponemos un modelo y un algoritmo de tratamiento que utilizan el síndrome compartimental intracraneal (ICCS) que puede servir como una mejora en el manejo del HI. El mapeo de cómo se pueden asociar diferentes técnicas es particularmente importante en lugares donde los recursos son escasos, como los países de bajos ingresos.²

DESARROLLO

El ICCS es un modelo de diagnóstico de deterioro del ICC que aplica diferentes técnicas de monitoreo con fines educativos como un estándar de atención. En cuanto al IH, el ICCS ocurre porque el cráneo es un compartimento no extensible con una adaptación limitada a los cambios de presión, y cuando el volumen interno alcanza un nivel crítico, el ICC se agota. La cavidad craneal rígida está interconectada con otras cavidades como el tórax y el cuello por los sistemas venoso y de líquido cefalorraquídeo (LCR), por lo que el IH puede desarrollarse debido a condiciones craneales y extracraneales.¹ Como en cualquier cavidad corporal, cuando la presión interna aumenta severamente, causa hipoperfusión, isquemia y daño tisular como consecuencia de la compresión de estructuras sensibles, como nervios y vasos sanguíneos.²

Diferentes fases del sistema compensatorio.¹ En la primera fase (**a**), el sistema compensatorio es efectivo durante una expansión de masa. La PIC no cambia en esta fase temprana, estando ajustados el CCI y el sistema compensatorio. En una segunda fase (**b**), el sistema compensatorio comienza a fallar tras un mayor aumento del efecto de masa. El flujo de salida del LCR y las venas comienza a sobrecargarse, comenzando la deformación cerebral y el deterioro del CCI. En una tercera fase (**c**), el sistema compensatorio está completamente agotado y la deformación cerebral y la pérdida del CCI son evidentes. PIC: presión intracraneal, CCI: compliancia intracraneal, LCR: líquido cefalorraquídeo.

Intracraneal	Extracraneal
<ul style="list-style-type: none"> ● Compresión extrínseca ● Fracturas de cráneo deprimidas ● Hematomas subdurales ● Contusiones cerebrales ● Edema cerebral 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Cuello <ul style="list-style-type: none"> ● Collarines cervicales ● Lateralización del cuello ● Trombosis yugular (catéteres, dispositivos de monitorización. Etc. ● Fijación del tubo orotraqueal 2) Tórax (aumento de la presión intratorácica) <ul style="list-style-type: none"> ● Neumotórax ● Hemotórax ● Ventilación mecánica (PEEP, asincronías)

	<ul style="list-style-type: none"> • Embolia pulmonar <p>3) Abdomen (aumento de la presión intrabdominal)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reanimación con líquidos • Íleo • Gastroparesias • Neumoperitoneo • Hemoperitoneo
--	--

CAUSAS DE LA HIPERTENSIÓN INTRACRANEAL

INTERES DE LA PERSPECTIVA

- 1) Proponer la integración de técnicas de monitorización para evaluar ICC
- 2) MONITORIZACION DE LA PIC.
- 3) DOPPLER TRANSCRANEAL(TCD).
- 4) PUPILOMETRIA
- 5) OXIMETRIA CEREBRAL
- 6) ESPECTROMETRIA DE INFRAROJO CERCANO (NIRS)
- 7) ANALISIS DE LA FORMA DE LA ONDA DE PIC (ICPW)
- 8) Nervio óptico Ultrasonido del diámetro de la vaina (ONSD)

CAUSA/EFECTO

La compresión de ICC, es importante puesto que existen muchas variables que modifican la PIC, pero que a su vez están repercuten sobre la PCC, conllevando a que exista HI, que compromete la distensibilidad intracraneal y con ello las complacencia cerebral, motivo por el cual la lesión cerebral ya sea esta traumática o no, desde que lesiona se comporta en un círculo vicioso, razón por el cual surgen muchas herramientas con contrarrestar y mejorar la dinámica cerebral y con llegar al SINDROME COMPARTIMENTAL INTRACRANEAL.

MUESTRA DEL ESTUDIO

Best-Trip-ensayo (2013)

- 1) Por Chesnut et al informó uno guiado por la monitorización continua de la presión intracraneal (PIC) y otro basado en el examen clínico y los hallazgos en la tomografía computarizada cerebral (TAC), De hecho, la mortalidad observada a los 6 meses en el grupo monitorizado fue del 39% frente al 41% en el no monitorizado. Pero a 14 días del trauma en el grupo guiado por monitorización de PIC (21 vs. 30% p = 0,18).
- 2) Cremer et al.³ no hallaron diferencias en los resultados monitorizando la PIC o no en pacientes con TCEG.
- 3) Shafi et al.⁴ mostraron que la monitorización de la PIC se asoció a peor supervivencia.
- 4) Brain Trauma Foundation» colocan la monitorización de la PIC como estándar de cuidados en esta población de pacientes⁴

- 5) Un neoyorkino¹, que incluyó pacientes con TCEG en 22 centros de trauma, encontró, tras ajustar predictores independientes de mortalidad, un descenso del 64% en el riesgo de muerte a las 2 semanas en aquellos individuos cuya PIC monitorizada respondía a la terapéutica.
- 6) El segundo⁴, publicado en 2012, y firmado por el mismo doctor Chesnut, concluye, tras analizar a 365 pacientes con TCEG y moderados, que los valores medios más elevados de PIC en las primeras 48 h de monitorización se asociaron, de forma independiente, a mayor mortalidad y peores resultados funcionales a los 6 meses.
- 7) Como señalara Prough³, ningún método de monitorización es capaz, por sí mismo, de afectar resultado alguno; es la información que el monitor brinda, debidamente analizada, la que verdaderamente influirá en el resultado, pero solo si al mismo tiempo origina cambios en el manejo terapéutico. 1993
- 8) Aquí surgen las primeras dudas. El estudio tiene su origen en Bolivia, recurriéndose durante el desarrollo del mismo a centros de Ecuador para completar el reclutamiento. Según señalan los propios autores, dichos centros fueron elegidos debido a que eran lugares donde se manejaban rutinariamente pacientes con TCEG sin monitorización de la PIC.
- 9) Por citar solo un ejemplo, en Chile existe la obligatoriedad de monitorizar la PIC en aquellos centros que traten este tipo de pacientes¹.
- 10) El estudio de Chesnut et al.¹ no puede usarse como argumento contra el empleo de la monitorización de la PIC para guiar el tratamiento de la HEC.

DATO DE INTERES

- 1) En el 2016, la Brain Trauma foundation, en su 4ta edición de la guía de manejo del TEC severo, estableció un nuevo límite de 22 mmHg dejando atrás el anterior de 20 mmHg.
- 2) Si bien, la técnica invasiva es de elección, esta conlleva riesgos en su colocación como son: hemorragia local y/o infecciones, fuera del hecho del consumo de tiempo, recursos, y de la necesidad imprescindible de un personal entrenado en su colocación.
- 3) En el 2012, el físico-químico brasilero, Sérgio Mascarenhas realizó una publicación que abrió una puerta hacia el monitoreo no invasivo de la PIC. Observó, mediante un sensor de deformación, ubicado en la superficie de un cráneo, que era posible registrar las micrométricas deformaciones producidas por las ondas de PIC sobre el mismo.⁴

Físico-químico brasilero, Sérgio Mascarenhas

- 1) 2012 monitoreo no invasivo de la PIC.
- 2) Sensor de deformación, ubicado en la superficie de un cráneo, que era posible registrar las micrométricas deformaciones producidas por las ondas de PIC.
- 3) Este método captura la morfología de la onda de PIC y sus componentes (P1, P2 y P3) y mediante un algoritmo calcula sus amplitudes y las relaciona ($P2/P1 \text{ ratio} = \text{Amp}P2/\text{Amp}P1$) de tal manera que cuando

la proporción es mayor a 1, es considerada una morfología anormal e indicativa de una compliance cerebral disminuida con alto riesgo de hipertensión intracraneal.

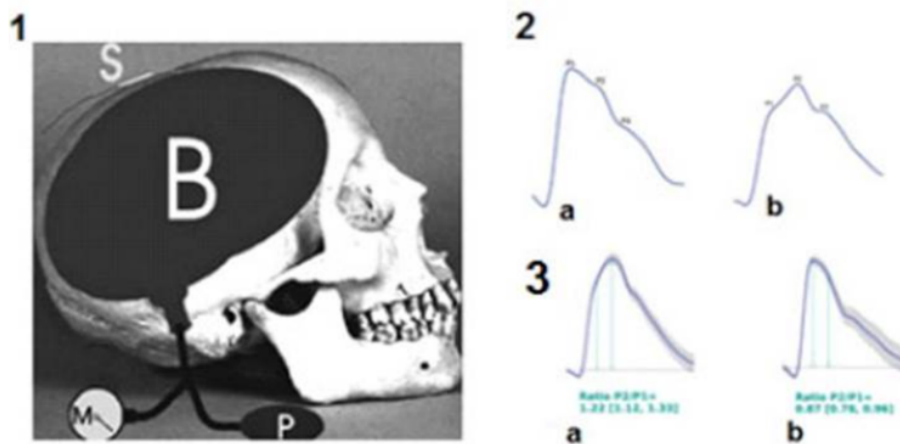


Figura 1 Fotografía del experimento de Mascarenhas y su sensor de deformación; S: sensor deformación, B: globo de aire, M: manómetro, P: perilla de aire. 2a Morfología normal de la onda de PIC con los 3 picos, P1: onda percusión, P2: onda tidal y P3: onda dicrótica. Lo normal es que la onda P1 sea mayor que la P2 y P3. 2b. La onda P2 más grande que la P1 lo que revela que la compliance cerebral se encuentra disminuida y que cualquier aumento del volumen cerebral producirá un aumento marcado de la PIC. 3a. Análisis de la onda de PIC mediante método no invasivo, donde se evidencia una onda P2 mayor que P1, con un razón P2/P1 > 1 lo que indica una disminución de la compliance cerebral. 3b. Efecto de las medidas terapéuticas para disminuir la PIC medido mediante método no invasivo.

MODELO INTEGRADOR

En etapas tempranas del desarrollo de la ICCS, una lesión ocupante de espacio (contusión) o un aumento del volumen del parénquima cerebral (edema) no causan un aumento de la PIC, siempre y cuando los sistemas de compensación y la autorregulación cerebral funcionen. Si el proceso no se aborta en este momento, la PIC aumentará exponencialmente, comprometiendo la perfusión, la oxigenación, el uso de energía y creando gradientes compartimentales que distorsionarán anatómicamente el tejido cerebral. Es importante remarcar que estos cambios no están necesariamente asociados a umbrales numéricos de PIC específicos, ya que podemos encontrar pacientes con pérdida de la CCI dentro de un “rango normal” predeterminado de PIC o en pacientes con CCI preservada que demuestran una PIC por encima de estos umbrales.²

Por lo tanto, el sello distintivo de la reducción en la CCI debe basarse en la morfología o forma de onda del pulso de la PIC (ICPW). La ICPW ha sido ampliamente estudiada y constituye el monitor líder en la caja de herramientas de diagnóstico de la ICCS. Los cambios en la morfología del pulso de la PIC se han relacionado directamente con el deterioro de la CCI, especialmente cuando el segundo pico (P2) asume una amplitud mayor que el primer pico (P1), pronosticando IH. En combinación con los cambios en la ICPW, se pueden agregar otros métodos invasivos y no invasivos como complementos sinérgicos para monitorear la oxigenación cerebral, la distensibilidad y la dinámica sanguínea.

UMBRALES TERAPEÚTICOS

- 1) Como determinar en qué momento P1 deja de ser superior a P2.

- 2) Las sondas de oximetría también pueden proporcionar temperatura del cerebro y un tejido cerebral local (alrededor de 2,5 cc).
- 3) Oxigenación (PbtO₂), ideal entre 20 y 35 mmHg[40]
- 4) Para NIRS y la saturación de oxígeno venosa yugular (SvjO₂) proporcionan porcentajes de oxígeno a la hemoglobina.
- 5) Para ICCS, utilizamos PIC > 20 mmHg y PbtO₂ < 20 mmHg o SO₂ < 50% si NIRS o SvjO₂.
- 6) ONSD menor a 5mm.
- 7) Pupilometría y el NPi < 3 como indicador de deterioro neurológico.
- 8) Electroencefalograma (EEG) como detector de lesión metabólica precoz.⁴

ENFOQUE TERAPEÚTICO

- 1) Tipo A: El tratamiento se basará en pruebas clínicas, de imagen, oxigenación hemodinámica, metabólica y intracraneal, supervisión. A partir de su análisis, el intensivista proceder a la implementación de medidas de cuidado general, que puede incluir neuroprotección fisiológica, ventilación mecánica y sedación/analgesia, evitando agresiones secundarias y previniendo la trombosis vena profunda, hemorragia gastrointestinal e infecciones. Anticonvulsivos cuando estén indicados, la nutrición y la rehabilitación tempranas son importantes medidas.
- 2) Tipo B; HI sin deterioro de la ICC, encaminado a buscar la causa, ej; hidrocefalia drenaje, tratar la asincronía de la VAM (analgesia y/o sedación).
- 3) Tipo C: ICCS grado I: HI puede o no estar presente, pero si la oxigenación cerebral está comprometida, conduce a una ICC. Medidas de neuroprotección según sus protocolos.
 - a. Seguimiento estrecho y continuo de la terapéutica y monitoreo de la morfología de las ondas.
 - b. Abstenerse de intensificar tratamientos más allá de lo recomendado.
 - c. Consideración temprana de drenaje y/o evacuación quirúrgica.
- 4) Tipo D; ICCS grado II: Tratamiento quirúrgico el ICCS está bien establecido.¹

CARACTERÍSTICAS DE LAS TÉCNICAS SUSTITUTIVAS NO INVASIVAS MÁS RELEVANTES PARA LA MONITORIZACIÓN DE LA PIC

	TCD	Oficina del Fiscal General	Pupilometría	Cerebro para el cuidado
Modo de uso	Serie/continuo	De serie	De serie	Serie/continuo
Estimación de IH	Numérico	Y/N	Y/N	Y/N
Capacitación de operadores	Alto	Bajo	Bajo	Bajo
Dependencia del operador	Alto	Alto	Bajo	Bajo
Fortalezas	Múltiples diagnósticos vasculares diferentes	Disposición para obtener resultados fácilmente repetibles	Baja dependencia del operador, evaluación del dolor en pacientes sedados	Alto valor predictivo negativo, seguimiento durante las intervenciones
Debilidades	Depende de las ventanas acústicas y de la disponibilidad del operador.	Alta variación interobservador	Baja precisión para la estimación de la PIC	No es adecuada para pacientes muy agitados; la neurocirugía provoca cambios en los umbrales.

Presión intracraneal PIC , hipertensión intracraneal HI , diámetro de la vaina del nervio óptico ONSD ecografía, Doppler transcraneal TCD , S/N sí o no

CONCLUSIONES

La gestión moderna de la LCA ha roto lo simplista del modelo de atención basado en la hipertensión intracraneal. El modelo propuesto integra la monitorización de la ICC, con variables monitorizadas tradicionales (invasivas y no invasivas) durante el TCE grave. El ICCS no se define por un umbral numérico específico de monitorización de la PIC, pero según su subtipo y monitorización multimodal, lo que sugiere enfoques terapéuticos para emergencias. Se necesitan estudios a gran escala para evaluar este modelo propuesto además de validar el uso de nuevas técnicas de monitorización no invasivas para comprender estos nuevos conceptos. Abogamos por mudarnos hacia nuevos conceptos y cambios de paradigma en la gestión del ITB para disminuir la mortalidad y la discapacidad asociado con un retraso en el proceso de toma de decisiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) The intracranial compartmental syndrome: a proposed model for acute brain injury monitoring and management: Daniel Agustín Godoy¹, Sérgio Brasil^{2*}, Corrado Iaccarino^{3,4,5}, Wellingson Paiva² and Andres M. Rubiano^{6,7}: Received: 5 December 2022 Accepted: 2 April 2023 *Critical care (Londres, Inglaterra)* vol. 27,1 137. 10 Abr. 2023, DOI: [10.1186/s13054-023-04427-4](https://doi.org/10.1186/s13054-023-04427-4)
- 2) Monitorización de la presión intracraneal en el traumatismo craneoencefálico grave: otra visión del Best Trip trial 2013 DOI: [10.1016/j.medin.2013.07.011](https://doi.org/10.1016/j.medin.2013.07.011)
- 3) El Futuro del monitoreo no invasivo de la presión intracraneal 2021 DOI: [10.35434/rcmhnaaa.2021.141.911](https://doi.org/10.35434/rcmhnaaa.2021.141.911)
- 4) Guidelines for the Management of Severe Traumatic Brain Injury 4th Edition 2016- <https://braintrauma.org/coma/guidelines/guidelines-for-the-management-of-severe-tbi-4th-ed>