

Monitoreo No invasivo de la presión Intracraniana por Doppler Transcraneano

Non-invasive Intracranial Pressure Monitoring with Transcranial Doppler

Monitoramento Não Invasivo da Pressão Intracraniana por Doppler Transcraniano

Silvana Svampa^a

Autor para correspondencia: Silvana Svampa e-mail: silvanasvampa@gmail.com

^a*Hospital Provincial de Neuquén Provincia de Neuquén Argentina*

Resumen

La presión intracraniana (PIC) se mide en forma invasiva desde hace varias décadas, utilizando dispositivos intraventriculares o intraparenquimatosos entre los más frecuentes en la actualidad, en el intento de controlar el daño generado por las lesiones neurológicas que conducen a diferentes grados de discapacidad o muerte. A pesar de los beneficios que arroja su uso, el costo, la disponibilidad de especialistas entrenados en la colocación y las complicaciones asociadas a su inserción se ven limitadas. Por ello se han ido desarrollando diferentes métodos de monitoreo no invasivo de la PIC. Uno de los más utilizados por su accesibilidad, es el Doppler transcraneano (DTC), el cual mide las velocidades del flujo sanguíneo cerebral en las arterias de la base del cráneo, pudiendo detectar de acuerdo a sus variaciones cambios en la presión de perfusión cerebral (PPC) y la presión intracraniana.

Keywords: Intracranial pressure, non-invasive monitoring, transcranial Doppler, cerebral perfusion pressure, pulsatility index, acute brain injury

Abstract

Intracranial pressure (ICP) has been measured invasively for several decades, using intraventricular or intraparenchymal devices, which are among the most common today, in an attempt to control the damage caused by neurological injuries leading to varying degrees of disability or death. Despite the benefits of its use, the cost, the availability of trained specialists for placement, and the complications associated with its insertion are limiting factors. Therefore, various non-invasive ICP monitoring methods have been developed. One of the most used due to its accessibility is transcranial Doppler (TCD), which measures blood flow velocities in the arteries at the base of the skull, and can detect changes in cerebral perfusion pressure (CPP) and intracranial pressure based on its variations.

Resumo

A pressão intracraniana (PIC) tem sido medida de forma invasiva há várias décadas, utilizando dispositivos intraventriculares ou intraparenquimatosos, que são atualmente os mais frequentes, na tentativa de controlar os danos causados pelas lesões neurológicas que conduzem a diferentes graus de incapacidade ou morte. Apesar dos benefícios do seu uso, o custo, a disponibilidade de especialistas treinados para a colocação e as complicações associadas à sua inserção são limitantes. Por isso, diferentes métodos de monitoramento não invasivo da PIC têm sido desenvolvidos. Um dos mais utilizados, pela sua acessibilidade, é o Doppler transcraniano (DTC), que mede as velocidades do fluxo sanguíneo cerebral nas artérias da base do crânio, podendo detectar, de acordo com suas variações, mudanças na pressão de perfusão cerebral (PPC) e na pressão intracraniana.

1. Introducción

El monitoreo invasivo de la presión intracraniana (PICi), sigue siendo el método “gold estándar” para la medición en forma continua, detección y tratamiento de la hipertensión endocraneana (HTE) en aquellos pacientes que han sufrido una lesión cerebral aguda (LCA) como un traumatismo de cráneo (TEC), una hemorragia subaracnoidea (HSA) una hemorragia intracerebral (HIC) o un accidente cerebrovascular isquémico (ACVI) entre las más importantes.

Sin embargo, las complicaciones que pueden aparecer como infecciones, hemorragias en el trayecto de colocación o problemas en la inserción, así como los altos costos que dificultan la disponibilidad del método han conducido en los últimos años a desarrollar técnicas de estimación de la PIC en forma no invasivas. (PICni)

Uno de los más estudiado es el doppler transcraneano (DTC), que es un método no invasivo, portátil, menos costoso, que se puede realizar al lado de la cama del paciente y repetir las veces que sea necesario, permitiendo aplicar medidas de tratamiento que mejoren la presión de perfusión cerebral (PPC) o disminuyan la PIC.

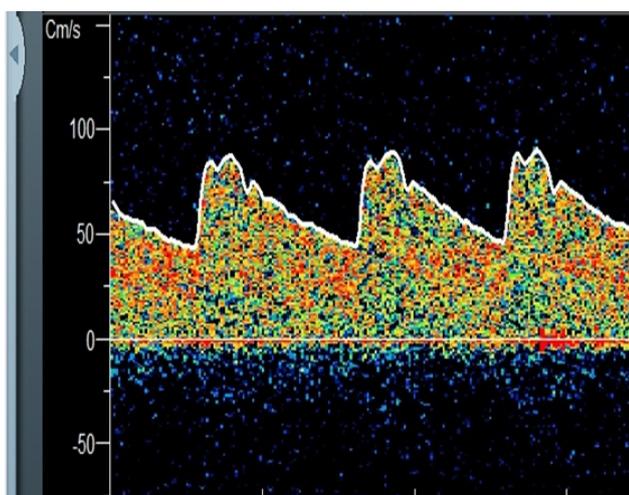
2. Métodos

Se realizó una búsqueda de los artículos más relevantes publicados en las últimas décadas en inglés, que involucren las palabras “intracranial pressure”, “transcranial Doppler” y “non-invasive monitoring”

2.1. Características del Doppler transcraneano

El DTC mide las velocidades de flujo (VF) proximal de las arterias de la base del cráneo, a nivel del polígono de Willis, tanto en la circulación anterior como posterior en tiempo real.

Su onda espectral presenta una VF sistólica o máxima (VFs) una VF diastólica o mínima (VFd) y una VF media (VFm). De la relación entre las mismas surgen los Índices de Pulsatilidad de Gosling (IP) y el Índice de resistencia de Pourcelot (IR). (Figura 1)



Índice de Pulsatilidad de Gosling:

$$IP = \frac{VF_s - VF_d}{VF_m} = 0,6 \text{ a } 1,2$$

Índice de Resistencia de Pourcelot

$$IR = \frac{VF_s - VF_d}{VF_s} < 0,7$$

Figura 1: Onda espectral, VF, IP e IR

Se ha demostrado a través de los años que el aumento de la PIC conduce a cambios en las VF de las arterias intracranianas. Antes de analizar los diferentes métodos desarrollados para estimar la PICni por DTC, es importante conocer las variables que pueden afectar la onda de flujo espectral y sus componentes.

- **Variables que afectan las VF:** Se enumeran aquellas variables que se producen a nivel intracraniano y por otro lado las de origen sistémico, provocando un aumento o disminución del flujo. (Tabla I)

Velocidades de flujo			
Aumentan	Vasoespasm Estenosis Anemia Hiperemia Hipertermia HTA Hipervolemia Hipercapnia Hipoxemia Gases anestésicos Volátiles	Disminuyen	Edad Hiperviscosidad Deshidratación Hipotensión arterial Hipocapnia Hipotermia Sedantes Hipnóticos
IP y Resistencia			
Aumentan	HTE Hipocapnia Regurgitación aórtica HTA crónica Leucoaraiosis PCC	Disminuyen	Hipercapnia Vasodilatación distal post Estenosis Hiperemia Hipervolemia Vasoespasm MAV

Tabla 1: Variables que afectan las VF y el IP

- **Aumentan las VF:** vasoespasm, estenosis, anemia, hiperemia, hipertermia, hipervolemia, hipertensión arterial (HTA), hipercapnia, hipoxemia, gases anestésicos volátiles.
- **Disminuyen las VF:** La edad, hiperviscosidad, deshidratación, hipotensión arterial, hipocapnia, hipotermia, sedantes e hipnóticos.

2.2. Variables que afectan el IP y la resistencia:

- **Aumentan el IP:** HTE, hipocapnia, regurgitación aórtica, HTA crónica, leucoaraiosis, parada circulatoria cerebral (PCC)
- **Disminuyen el IP:** hipercapnia, vasodilatación distal post-estenosis, hiperemia, hipervolemia, vasoespasm y malformación arterio-venosa (MAV)

2.3. Métodos de monitoreo no invasivo de la PIC por DTC

A través de los años se han investigados diferentes métodos para estimar la PICni mediante el monitoreo con DTC. Se han desarrollados métodos basados en el índice de pulsatilidad (IP), otros basados en la presión de perfusión cerebral (PPC) y finalmente otros métodos basados en modelos matemáticos. (Figura 2)

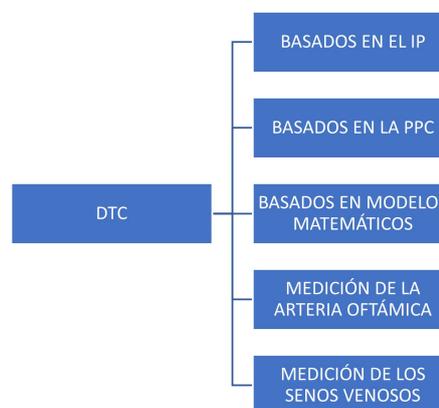


Figura 2: Métodos de medición de la PIC y PPC ni

2.3.1. Métodos basados en el IP

La onda espectral del DTC es similar a la onda de PIC impulsada por el ciclo cardíaco. El IP es inversamente proporcional a la PPC y directamente proporcional a la amplitud de pulso, presión arterial (PA), compliance del lecho arterial, elasticidad de la resistencia vascular cerebral distal (RVC) y frecuencia cardíaca.

Se calcula por la siguiente fórmula:

$IP = \frac{VF_s - VF_d}{VF_m}$ En condiciones normales el IP aumenta con la PIC en "forma lineal" (Figure 3). Pero hay factores que modifican esta relación lineal como las alteraciones de la autorregulación cerebral (ARC), la distensibilidad de los vasos, la PA media (PAM), el estado de la dinámica cerebral de acuerdo a la LCA, haciendo menos confiable al IP como indicador de HTE.

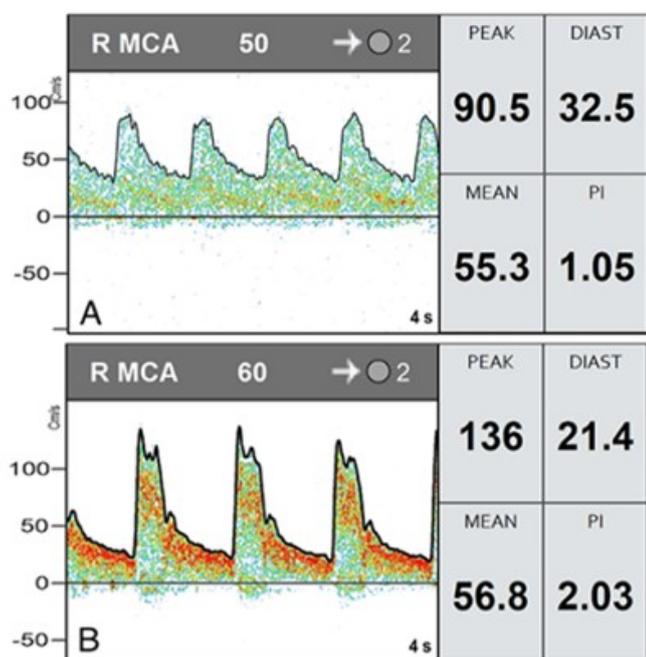


Figura 3: Afectación de la onda espectral por HTE

Si embargo algunos autores como Bellner Bellner et al. (2004) y col. en el 2004 encontraron que en condiciones de normoventilación y PA estable, el aumento del IP es atribuible a una elevación de la PIC que comprime fácilmente las arteriolas y aumenta la resistencia vascular reduciendo el flujo.

$PIC_{ni} = (11,1 \times IP) - 1,43$ Sobre la base de esta fórmula Bellner concluye que el $IP > 2,13$ se correlaciona con una $PIC_i > 22$ mmHg, mientras que un $IP < 1,2$ correspondería a una $PIC_i < 12$ mmHg.

Este mismo grupo en el 2014, encontraron en 82 pacientes con distintas enfermedades neurocríticas (HSAe, TEC y otras) un excelente intervalo de confianza (IC) con la PIC ($R^2 = 0,938$) con la fórmula: $PIC : 10,93 \times IP - 1,28$. Estos resultados no pudieron ser replicados en otros estudios y poblaciones.

Voulgaris et al. (2005). Por otro lado, hallaron una relación significativa entre el IP y la PIC_i dentro de las primeras 48 horas de una LCA cuando la PIC inicial superaba los 20 mmHg

($r^2 = 0.82$ con una $p < 0,0001$).

Wang et al. (2014). En el 2014 observaron una correlación significativa de la PIC invasiva con el IP e IR ($r = 0.90$ y 0.89). Cuando el IP superaba valores de 1,35 la sensibilidad y especificidad para predecir HTE eran de 0.885 y 0.97.

Un estudio prospectivo realizado por Bouzat et al. (2016). en el 2016 estudió 356 pacientes con traumatismo de cráneo (TEC) leve y moderado (GSC de 9 a 15 puntos). Se les realizó DTC bilateral después de las 8 horas y durante 7 días del TEC para evaluar si era predictor de deterioro neurológico (DN). Se consideraron el $IP > 1.25$ y VF diastólico (VFd) < 25 cm/s como predictores de mal pronóstico. El 6 % empeoró, con una sensibilidad (S) del 80 % y una especificidad (E) del 79 %. El valor predictivo negativo (VPN) fue del 98 % y el valor predictivo positivo (VPP) del 18 %. Por lo tanto, es más importante como predictor pronóstico encontrar un DTC normal.

Un trabajo chino5 publicado en el 2022, prospectivo realizados en pacientes con TEC, se correlacionó el valor del IP con la mortalidad hospitalaria, concluyendo que valores superiores a 1.11 se asociaban a mayor mortalidad.

2.3.2. Métodos basados en la PPC No Invasiva (ni)

Aaslid Mei et al. (2022) fue el primero en describir que la PPC se puede estimar por los cambios en las VF y la PA.

Czosnyka Czosnyka et al. (1998) en 1998 estimó la PPC_{ni} agregando al componente armónico de la PA descrito por Aaslid Aaslid et al. (1982), la VFd. Tuvo un alto VPP (94 %) para detectar $PPC < 60$ mmHg. La correlación entre la PPC medida y la PPC estimada fue del $r = 0.73$. El error de estimación en el 71 % de los casos fue menor de 10 mmHg.

Schmidt en el 2002 Schmidt and Klingelhöfer (2002) incorporó a la fórmula la reducción de la VF diastólica (VFd) y un coeficiente de corrección de 14 mmHg para calibración. Los resultados obtenidos para estimar la PIC_{ni} tuvieron una diferencia absoluta con la PIC_i a 10 mmHg en el 89 % de los casos y < 13 mmHg en el 92 %.

Édouard en el 2005 Édouard et al. (2005) combinó los valores de VF medio (VFm), VFd con presión arterial media (PAM) y presión arterial diastólica (PAD) para poder estimar la PPC . En su estudio concluyó que la precisión del método depende de los valores de HTE, cuanto más elevada mayor correlación.

Rasulo Rasulo et al. (2017) y col. Publicaron en el 2017 un trabajo que estudió el comportamiento de la PIC_{ni} vs la PIC_i en 38 pacientes con LCA (20 TEC, 11 HSA y 7 HIC). Se utilizó para cálculo de la PPC y la PIC la siguiente fórmula:

$PPC_n = (PAM \times VFd / VFm) + 14$; $PIC_{dte} = PAM - PPC_n$ (Figura 4)

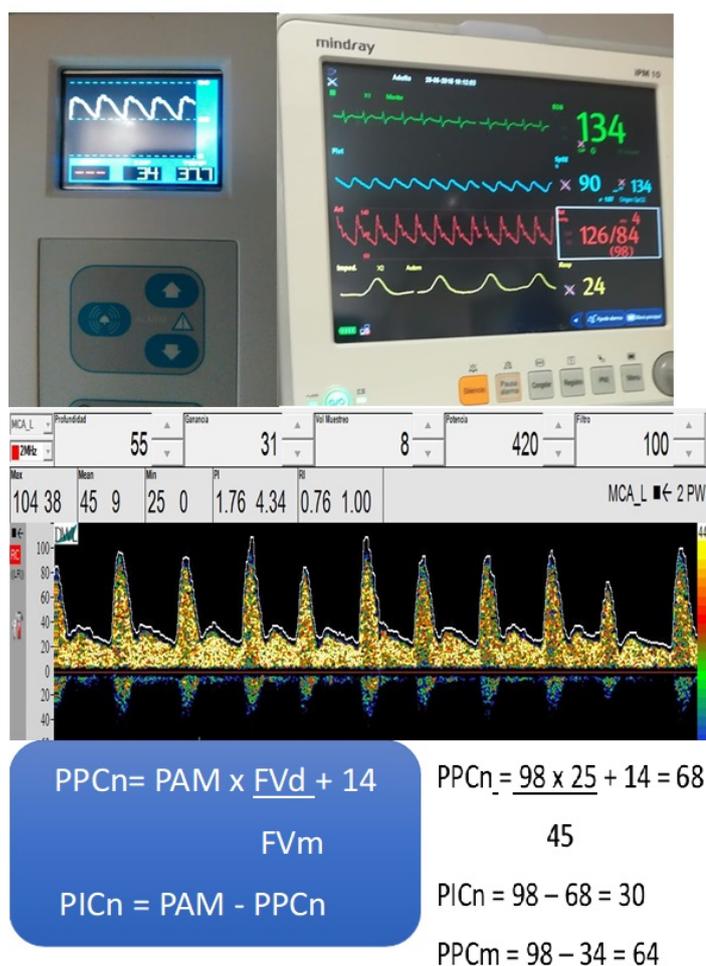


Figura 4: Cálculo de la PPC y PICni

Se realizaron mediciones de la PIC por DTC en 3 momentos: antes de la colocación de la PICi, inmediatamente al final de la inserción del catéter de PIC y la tercera dentro de las 2 a 3 horas después de la colocación. Se realizaron un total de 114 lecturas de las cuales 20 fueron con PIC elevada. Encontraron un excelente valor predictivo negativo (VPN) de la PIC calculada por DTC, es decir que cuando la PICi era normal, el valor obtenido por DTC también era normal. Cuando la PICi superaba los valores de 24.8 mmHg, la sensibilidad y especificidad del DTC era del 100 % y 91.2 %.

Rasulo Rasulo et al. (2022) en el año 2022 publica un trabajo similar, pero con 262 pacientes para el análisis final, 87 (33.2 %) de ellos presentaron HTE. Se pudieron comparar 687 mediciones entre PICi y PICni. El VPN fue de 91.3 % cuando la PIC era > 20 mmHg, 95.6 % cuando superaba los 22 mmHg y alcanzaba un VPN de 98.6 cuando la PIC > 25 mmHg. Siendo el DTC un método altamente sensible para excluir HTE y de suma utilidad en aquellos casos donde el monitoreo invasivo está contraindicado o no se dispone del mismo por los costos elevados o falta de recurso humano especializado en la colocación. Este mismo trabajo solo encontró un 33,3 % de concordancia entre la PICi y la PICni.

Cardim Cardim et al. (2016c) y colaboradores publicaron en el 2016 un estudio de cohorte en 40 pacientes con TEC, y compararon 4 métodos de medición de PICni: el primero consistía en estimar la PIC en base a la relación entre la PAM y el DTC, este modelo matemático se describirá más adelante como “Caja Negra”; el 2° basado en la VFd y su correlación con la PPC; el 3° basado en la presión crítica de cierre (PCCr), concepto desarrollado por Czosnyka (ver más abajo) y el 4° basado en el IP, siendo este último el método que mejor se correlacionó con la PICi en cuanto a las variaciones dinámicas eran > 7 mmHg, pero fue el peor estimador del valor absoluto de la PIC. Con respecto a los valores máximos y mínimos hubo una mejor correlación con el modelo de caja negra. La PCCr no logró diferenciar los valores de PIC normal vs elevada (AUC= 0.64, P > 0.05).

Cardimet al. (2020). condujeron otro trabajo en el 2020 que comparó PICni por DTC utilizando esta fórmula ya comentada por Rasulo, destacando que la alteración de la onda espectral del DTC se da por descenso de la VFd por aumento de la PIC. En una población de 100 pacientes con TEC se realizó el DTC el mismo día de la inserción del monitoreo de PIC. No se encontró una correlación entre la PIC calculada por DTC vs la PICi, desestimando este método basado en la VFd.

Czosnyka Czosnyka et al. (1999) introduce el concepto de presión crítica de cierre (PPCr) en 1994. La define como el umbral inferior de la PA donde los valores menores no previenen en la microvasculatura el colapso vascular y el cese del flujo sanguíneo cerebral (FSC). Su fórmula incluye la WT que es la tensión de la pared vascular de los pequeños vasos que reflejan los cambios hemodinámicos en diferentes situaciones patológicas.

Cardim Schmidt et al. (1997) considera que la PPCr es el método más preciso para medir la PICni.

2.3.3. Métodos basados en modelos matemáticos

- **Basados en teoría:** Son modelos matemáticos que simulan estados intracraniales. Se clasifican en modelos Hemodinámicos e Hidrodinámicos. Ambos resultan muy complejos de interpretar ya que se basan en la dinámica de los fluidos intracraniales
- **Basados en datos:** son más comunes, el más conocido es el modelo de caja negra publicado por Schmidt Schmidt et al. (1997) inicialmente en 1997. Consiste en una transferencia lineal entre la PA y las VF detectadas por DTC, transformando la señal de PA en una curva de PIC. Estudió los registros de VF, PA y PIC de 11 pacientes con TEC. La diferencia en valores absolutos entre la PIC medida y la obtenida fue de $4,0 \pm 1.8$ mmHg. Posteriormente diferentes autores Cardim et al. (2016a,b); Robba et al. (2016) en el 2016-2017 intentaron mejorar la precisión de este modelo.

2.3.4. Métodos combinados de monitoreo no invasivo de la PIC

Robba et al. (2017, 2020). Publican en el 2017 un estudio observacional basado en distintos métodos no invasivos de cálculo

de la PIC. Algunos estudios combinan el DTC y el diámetro de la vaina del nervio óptico (DVNO); Chang Chang et al. (2021) y col encuentran que el $IP > 1.2$ predice la HTE con un valor AUC de 0.729 (IC 95 %: 0.623-0,834) y la DVNO (> 5 mm) un 0.900 (IC 95 %: 0.831-0.969), mientras que combinados aumentan la predicción de HTE a 0.943 (IC 95 %: 0.866-1.000s PICi, entre ellos DVNO, DTC venoso (DTCv) y DTC con medición de VF en ACM, IP y VFd. Hubo una buena correlación entre la PICi y el DVNO, así como la VF del seno venoso (VFsv) específicamente el seno recto, y los mejores resultados para predecir HTE se obtuvieron al combinar estos 2 métodos.

Otro trabajo publicado en el 2023 Dokponou et al. (2023) y realizado en diferentes países africanos, de escasos recursos para obtener el monitoreo invasivo de la PIC, compararon diferentes métodos no invasivos para detectar HTE, entre ellos DVNO medido por ultrasonido, tomografía y resonancia y concluyeron que un $IP > 1,2$ medido por DTC es el método más sensible (92.3 %) y específico (70 %) para detectar HTE, con un VPP de 66.7, un VPN de 93.3 y un AUC de 0,85.

2.3.5. Otros Métodos por DTC

Ragauskas et al. (2005) han podido estimar la PICni midiendo los segmentos intra y extracraneos de la arteria oftálmica (AO). El segmento intracraneal de la AO se correlaciona con la PIC por estar sujeto a la presión del compartimento intracraneal. Sobre el segmento extracraneal se aplica una presión externa. La sensibilidad, especificidad y el AUC para una PIC ≥ 20 mmHg fueron de 0.72, 0.77 y 0.71. Las desventajas de insonar la AO a través del globo ocular es la presencia de algunas enfermedades como el glaucoma o un síndrome compartimental.

También se ha descrito en estudios experimentales que el flujo venoso se ve alterado por aumento de la PIC antes de repercutir sobre el lecho arterial. La vena de Rosenthal a través de la ventana transtemporal se la reconoce a una profundidad entre 60 a 70 mmHg, orientando el transductor hacia la localización de la arteria cerebral posterior y el seno recto por la transoccipital a una profundidad de 50 a 80 mmHg. Schoser et al. (1999)

Un trabajo publicado en Neurocritical Care 25 en el 2019 demuestra que la pulsatilidad del flujo venoso disminuye al aumentar la PIC. Por ejemplo, a nivel cortical la presión venosa difiere de la PIC en apenas 2 a 5 mmHg 26, por lo cual la HTE afecta en forma directa y temprana el flujo cortical ya que el compartimento venoso contiene más del 70 % del volumen sanguíneo cerebral (VSC) y las venas tiene paredes muy delgadas que hacen que se colapsen fácilmente al aumentar la PIC.

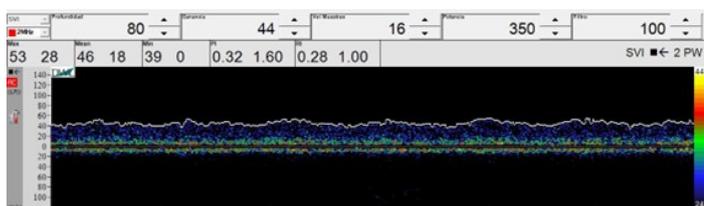


Figura 5: Ventana Transoccipital. Seno Recto (SR) paciente con HTE

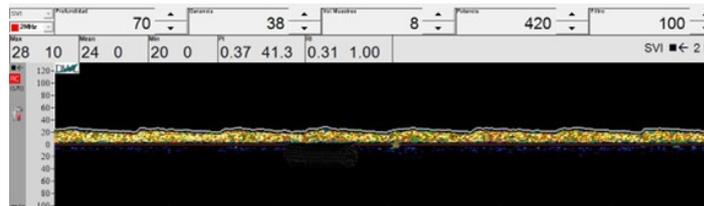


Figura 6: Ventana Transtemporal. Vena de Rosenthal (VR) paciente con HTE

3. Conclusion

Podemos concluir que el DTC es una herramienta útil para poder calcular PIC y PPC cuando el monitoreo de PIC no está disponible. Su sensibilidad y especificidad varían de acuerdo al método utilizado, pero debemos destacar el VPN alto para destimar la necesidad del monitoreo invasivo. Sus limitaciones ya conocidas se deben a la posibilidad de malas ventanas para insonar, desconocer variables sistémicas que pueden modificar las velocidades y resistencias y ser un método operador dependiente. El IP se correlaciona mejor con la PPC que con la PIC. Mejora su rendimiento si se complementa con otros métodos no invasivos como el DVNO.

Referencias

- Aaslid, R., Markwalder, T.M., Normes, H., 1982. Noninvasive transcranial doppler ultrasound recording of flow velocity in basal cerebral arteries. *Journal of neurosurgery* 57, 769–774.
- Bellner, J., Romner, B., Reinstrup, P., Kristiansson, K.A., Ryding, E., Brandt, L., 2004. Transcranial doppler sonography pulsatility index (pi) reflects intracranial pressure (icp). *Surgical neurology* 62, 45–51.
- Bouzat, P., Almeras, L., Manhes, P., Sanders, L., Levrat, A., David, J.S., Cinotti, R., Chabanne, R., Gloaguen, A., Bobbia, X., et al., 2016. Transcranial doppler to predict neurologic outcome after mild to moderate traumatic brain injury. *Anesthesiology* 125, 346–354.
- Cardim, D., Czosnyka, M., Donnelly, J., Robba, C., Cabella, B., Liu, X., Cabeleira, M., Smielewski, P., Haubrich, C., Garnett, M., et al., 2016a. Assessment of non-invasive icp during csf infusion test: an approach with transcranial doppler. *Acta Neurochirurgica* 158, 279–287.
- Cardim, D., Robba, C., Bohdanowicz, M., Donnelly, J., Cabella, B., Liu, X., Cabeleira, M., Smielewski, P., Schmidt, B., Czosnyka, M., 2016b. Non-invasive monitoring of intracranial pressure using transcranial doppler ultrasonography: is it possible? *Neurocritical care* 25, 473–491.
- Cardim, D., Robba, C., Czosnyka, M., Savo, D., Mazeraud, A., Iaquaniello, C., Banzato, E., Reborá, P., Citerio, G., 2020. Noninvasive intracranial pressure estimation with transcranial doppler: a prospective observational study. *Journal of Neurosurgical Anesthesiology* 32, 349–353.
- Cardim, D., Robba, C., Donnelly, J., Bohdanowicz, M., Schmidt, B., Damian, M., Varsos, G.V., Liu, X., Cabeleira, M., Frigieri, G., et al., 2016c. Prospective study on noninvasive assessment of intracranial pressure in traumatic brain-injured patients: comparison of four methods. *Journal of neurotrauma* 33, 792–802.
- Chang, T., Yan, X., Zhao, C., Zhang, Y., Wang, B., Gao, L., 2021. Noninvasive evaluation of intracranial pressure in patients with traumatic brain injury by transcranial doppler ultrasound. *Brain and Behavior* 11, e2396.
- Czosnyka, M., Matta, B.F., Smielewski, P., Kirkpatrick, P.J., Pickard, J.D., 1998. Cerebral perfusion pressure in head-injured patients: a noninvasive assessment using transcranial doppler ultrasonography. *Journal of neurosurgery* 88, 802–808.
- Czosnyka, M., Smielewski, P., Piechnik, S., Al-Rawi, P.G., Kirkpatrick, P.J., Matta, B.F., Pickard, J.D., 1999. Critical closing pressure in cerebrovascular circulation. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 66, 606–611.
- Dokponou, Y.C.H., Badirou, O.B.A., Agada, K.N., Dossou, M.W., Lawson, L.D., Ossaga, M.A.D., Nyalundja, A.D., de Paule Adjou, D.K.F., Lassissi, K.U., Houndodjé, S.M.C., et al., 2023. Transcranial doppler in the

- non-invasive estimation of intracranial pressure in traumatic brain injury compared to other non-invasive methods in lower-middle income countries: Systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Neuroscience* 113, 70–76.
- Edouard, A., Vanhille, E., Le Moigno, S., Benhamou, D., Mazoit, J.X., 2005. Non-invasive assessment of cerebral perfusion pressure in brain injured patients with moderate intracranial hypertension. *British Journal of Anaesthesia* 94, 216–221.
- Mei, T., Zhou, Q., Chen, L., Jia, Z., Xiao, W., Xu, L., 2022. Cerebral pulsatility index and in-hospital mortality in chinese patients with traumatic brain injury: A retrospective cohort study. *Journal of Clinical Medicine* 11, 1559.
- Ragauskas, A., Daubaris, G., Dziugys, A., Azelis, V., Gedrimas, V., 2005. Innovative non-invasive method for absolute intracranial pressure measurement without calibration, in: *Intracranial Pressure and Brain Monitoring XII*, Springer. pp. 357–361.
- Rasulo, F.A., Bertuetti, R., Robba, C., Lusenti, F., Cantoni, A., Bernini, M., Girardini, A., Calza, S., Piva, S., Fagoni, N., et al., 2017. The accuracy of transcranial doppler in excluding intracranial hypertension following acute brain injury: a multicenter prospective pilot study. *Critical care* 21, 1–8.
- Rasulo, F.A., Calza, S., Robba, C., Taccone, F.S., Biasucci, D.G., Badenes, R., Piva, S., Savo, D., Citerio, G., Dibù, J.R., et al., 2022. Transcranial doppler as a screening test to exclude intracranial hypertension in brain-injured patients: the impressit-2 prospective multicenter international study. *Critical Care* 26, 110.
- Robba, C., Bacigaluppi, S., Cardim, D., Donnelly, J., Bertuccio, A., Czosnyka, M., 2016. Non-invasive assessment of intracranial pressure. *Acta Neurologica Scandinavica* 134, 4–21.
- Robba, C., Cardim, D., Tajsic, T., Pietersen, J., Bulman, M., Donnelly, J., Lavinio, A., Gupta, A., Menon, D.K., Hutchinson, P.J., et al., 2017. Ultrasound non-invasive measurement of intracranial pressure in neurointensive care: a prospective observational study. *PLoS medicine* 14, e1002356.
- Robba, C., Pozzebon, S., Moro, B., Vincent, J.L., Creteur, J., Taccone, F.S., 2020. Multimodal non-invasive assessment of intracranial hypertension: an observational study. *Critical Care* 24, 1–10.
- Schmidt, B., Klingelhöfer, J., 2002. Clinical applications of a non-invasive icp monitoring method. *European journal of ultrasound* 16, 37–45.
- Schmidt, B., Klingelhöfer, J., Schwarze, J.J., Sander, D., Wittich, I., 1997. Noninvasive prediction of intracranial pressure curves using transcranial doppler ultrasonography and blood pressure curves. *Stroke* 28, 2465–2472.
- Schoser, B.G., Riemenschneider, N., Hansen, H.C., 1999. The impact of raised intracranial pressure on cerebral venous hemodynamics: a prospective venous transcranial doppler ultrasonography study. *Journal of neurosurgery* 91, 744–749.
- Voulgaris, S.G., Partheni, M., Kaliora, H., Haftouras, N., Pessach, I.S., Polyzoidis, K.S., 2005. Early cerebral monitoring using the transcranial doppler pulsatility index in patients with severe brain trauma. *Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental and Clinical Research* 11, CR49–52.
- Wang, Y., Duan, Y.Y., Zhou, H.Y., Yuan, L.J., Zhang, L., Wang, W., Li, L.H., Li, L., 2014. Middle cerebral arterial flow changes on transcranial color and spectral doppler sonography in patients with increased intracranial pressure. *Journal of Ultrasound in Medicine* 33, 2131–2136.