

# Avance online de artículo en prensa

## CARTAS CIENTÍFICAS

### Monitorización multimodal no invasiva de la presión intracraneal a gran altitud con el Dúplex transcraneal codificado en color de la arteria cerebral media

*Noninvasive multimodal monitoring of intracranial pressure at high altitude with transcranial color-coded duplex sonography of the middle cerebral artery*

Adrián Ávila-Hilari<sup>1,4</sup>, Fausto Maldonado Coronel<sup>2,4</sup>, Manuel Luis Avellanas-Chavala<sup>3,4</sup>

La hipertensión intracraneal (HIC) está asociada con altas tasas de mortalidad y malos resultados neurológicos<sup>1</sup>.

Los sistemas intraparenquimatosos e intraventriculares son los métodos de monitorización invasiva considerados como el estándar para medir la presión intracraneal (PIC), pero la capacidad de monitorización de la PIC varía considerablemente entre centros hospitalarios y países<sup>2</sup>. En América Latina, es habitual que la monitorización y manejo de la PIC se realice mediante métodos de monitorización no invasivos (nPIC)<sup>3</sup>, en parte por los recursos limitados o situaciones donde es imposible utilizar medios invasivos como las emergencias prehospitalarias<sup>4</sup>. El Consenso de Bruselas para la estimación de la PIC con métodos nPIC, en ausencia de métodos invasivos, ha establecido una serie de recomendaciones. Entre ellas destacan<sup>5</sup>:

- En pacientes con trauma craneal grave (puntuación en la Escala del Coma de Glasgow –ECG– < 9) y signos radiológicos de HIC, se debe utilizar la PIC invasiva, si está disponible y no contraindicada.

- Las principales herramientas para la estimación con nPIC (si están disponibles) serán: el pupilómetro automático, el dúplex transcraneal codificado en color (DTCC) y la medición del diámetro de la vaina del nervio óptico (DVNO).

- Para la estimación de la PIC con métodos nPIC, deben utilizarse dos modalidades de medición diferentes.

- Para evaluar los cambios de la PIC con métodos nPIC se deben hacer estimaciones seriadas (recomendación débil: cada 2-4 h si ECG < 9, y cada 4-6 h si ECG es superior<sup>2</sup>).

Recientemente, nuestro grupo publicó un artículo sobre la ultrasonografía del DVNO a gran altitud (3.650-4.150 m) en nativos sanos, para determinar sus valores normales reales. Como su diámetro puede aumentar con la altitud, había que establecer valores referenciales de normalidad antes de ser utilizados en esas altitudes<sup>4</sup>.

Con el DTCC, mediante una adecuada insonación de la arteria cerebral media (ACM), se puede obtener una onda de pulso donde determinar valores útiles para la monitorización del flujo como la velocidad del pico sistólico (VPS), la velocidad diastólica final (VDF) y la velocidad media (VM), y calcular el índice de pulsatilidad (IP) y el índice de resistencia (IR)<sup>6</sup>.

La altitud es un potente factor de estrés fisiológico que se manifiesta con un incremento del flujo sanguíneo cerebral (FSC), influido por gran cantidad de variables como la respuesta ventilatoria hipóxica o hipercápnic, la vasodilatación cerebral hipóxica o la vasoconstricción cerebral hipocápnic<sup>7</sup>. Además de los factores determinantes del incremento del FSC en la altitud, existen otros factores contribuyentes como los derivados de la activación del factor inducible por la hipoxia, entre ellos el óxido nítrico, la adenosina, y el factor de crecimiento endotelial vascular<sup>7,8</sup>.

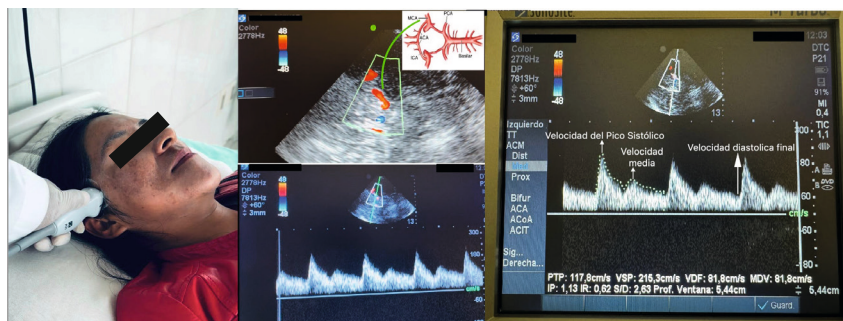
El objetivo del estudio ha sido determinar las velocidades de flujo, IP e IR de la ACM mediante DTCC a 3.650 y 4.150 metros sobre el nivel del mar en voluntarios nativos sanos, para que sus resultados sirvan como referencia de normalidad en altitudes superiores a 3.500 m para la monitorización multimodal no invasiva, junto al DVNO y la evaluación clínica.

Se realizó un estudio descriptivo y observacional, durante los años 2022-2023, en la Clínica CIES (3.650 msnm, La Paz) y el Hospital Municipal Boliviano Holandés (HMBH) (altitud: 4.150 m, El Alto), ambos de Bolivia. Se utilizó un equipo de ultrasonido Sonosite Inc, Modelo M-TURBO con transductor L38xi Lineal 10-15 MHz en modo B.

La ACM se identificó con el modo sonográfico Doppler color en el segmento M1. El flujo que se dirige hacia el transductor se muestra en rojo y en azul el que se aleja. Después de identificar la ACM en el ángulo de 30° a 60° paralelo al vaso insonado, se procedió a la determinación de las velocidades de flujo. Los índices de pulsatilidad y de resistencia fueron calculados por el programa del ecógrafo (Figura 1).

Los criterios de inclusión fueron la edad superior a 18 años y ser voluntarios sanos nacidos y crecidos en cada una de las dos ciudades donde se realizaron los estudios. Antes de proceder a la medición ecográfica se valoraron signos vitales clásicos, presión arterial, frecuencia cardiaca y respiratoria, saturación de oxígeno (la considerada normal a esa altitud) y la puntuación en la ECG. Fueron excluidos aquellos participantes con alguna anomalía en los signos vitales, así como todos aquellos con patología neurológica. El estudio fue aprobado por los Comités de Ética de los dos hospitales, la investigación se llevó a cabo de acuerdo con los principios de la declaración de Helsinki y todos los participantes firmaron el consentimiento informado.

En total participaron 373 personas. En la clínica CIES participaron



**Figura 1.** Ejemplo de monitorización de las velocidades de flujo, índice de pulsatilidad y resistencia en la arteria cerebral media por dúplex transcraneal codificado en color. ACM: arteria cerebral media; DTCC: dúplex transcraneal codificado en color; PTP: pico a pico, VSP: velocidad pico sistólica; VDF: velocidad diastólica final; MDV: velocidad media, IP: índice de pulsatilidad, IR: índice de resistencia, S/D: relación sístole diástole.

# Avance online de artículo en prensa

**Tabla 1.** Velocidades de flujo e Índices de pulsatilidad y resistencia en la Clínica CIES y en el Hospital Municipal Boliviano Holandés (HNBH)

Resultados	VPS (cm/s)	VDF (cm/s)	VM (cm/s)	IP	IR
<b>Velocidades de flujo e índices de pulsatilidad y resistencia: Nivel del mar<sup>9</sup></b>					
Índice de referencia	90-100	35-55	55-80	0,81-0,97	0,54-0,62
<b>Velocidades de flujo e índices de pulsatilidad y resistencia: Clínica CIES La Paz (3.650 m de altitud)</b>					
Media (DE)	147,5 (42,8)	72,5 (17,6)	96,9 (22,4)	0,9 (0,24)	0,79 (0,33)
Mediana	148,6	73,2	99	0,91	0,68
Rango intercuartil	118,9-178,7	61,4-88,4	82,7-112	0,7-1,2	0,6-0,9
IC 95%*	140,7-147,5	69,7-75,3	93,4-100,5	0,93-1,03	0,74-0,84
<b>Velocidades de flujo e índices de pulsatilidad y resistencia: revisado en el HNBH (4.150 m de altitud)</b>					
Media (DE)	159,2 (36,6)	72,6 (19,1)	100,5 (23,6)	0,84 (0,22)	0,54 (0,73)
Mediana	159,4	71	102	0,81	0,54
Rango intercuartil	132,5-189,5	59,4-88,3	84-119	0,7-0,9	0,5-0,6
IC 95%*	153-165,3	69,4-75,8	96,62-104,5	0,8-0,87	0,53-0,55

VPS: velocidad pico sistólico; VDF: velocidad diastólica final; VM: velocidad media; IP: índice de pulsatilidad; IR: índice de resistencia; cm/s: centímetros/segundos; IC 95%\*: intervalo de confianza del 95% de la mediana.

201, con una edad media de 22 años (DE 4), y el 54% hombres. En el HNBH 172, con una edad media de 25 (DE 5), el 45% hombres. En la Tabla 1 se muestran los resultados observados junto a los valores de referencia a nivel del mar<sup>9</sup>. Los valores VPS, VFD y VM hallados en voluntarios sanos fueron superiores a los usados de referencia. Se observó un incremento en las velocidades medidas relacionado con la altitud: a mayor altitud mayores cifras de velocidad, y la VPS fue la que mostró mayores diferencias. Por el contrario, los índices (IP, IR) se mantuvieron con valores dentro del rango observado a nivel del mar.

Los resultados obtenidos difieren de otras publicaciones. Un estudio realizado en Quito, Ecuador (2.850 m) con 47 voluntarios sanos encontró velocidades más inferiores: VPS de  $74,4 \pm 21,1$  cm/s y VM de  $49,3 \pm 14,7$  cm/s<sup>10</sup>. Otro realizado a 4.320 m de altitud con 21 hombres andinos reportó valores del FSC un 20% más bajo que al nivel del mar<sup>11</sup>. Los autores atribuyen estos resultados al aumento de la viscosidad sanguínea debida a la eritrocitosis compensatoria de los habitantes de las grandes altitudes. Las muestras de estos estudios son pequeñas y además existen otros factores que pueden influir en los resultados, como estar realizados con doppler transcranial y no con DTCC, cuyos valores son entre el 10-15% superiores<sup>8,12</sup>, debido a un mejor ajuste del volumen y alienación del ángulo. La edad y el género también influyen

en los valores estudiados: en un estudio realizado a 2.850 m de altura, se encontraron valores más altos cuando la edad es inferior a los 40 años y cuando el género es femenino<sup>10</sup>.

La mayor limitación del estudio reside en la aplicabilidad de los resultados en el rango de altitudes donde se han estudiado o similares.

Como conclusión, la monitorización de las variables estudiadas a través del DTCC, junto al DVNO y la evaluación clínica aportan una referencia en la monitorización multimodal no invasiva de pacientes con riesgo de HIC y sin posibilidad de monitorización invasiva de la PIC en altitudes elevadas. Disponer de valores de referencia de la normalidad ayuda a la toma de decisiones durante la atención inicial y la evolución de los pacientes. La utilización de métodos no invasivos puede ser de utilidad no solo en la atención en altura, también para los equipos de emergencias en el terreno o durante el traslado y para los servicios de urgencias que pueden recibir a estos pacientes.

## Bibliografía

- 1 Robba C, Graziano F, Reborja P, Elli F, Giussani C, Oddo M et al; SYNAPSE-ICU Investigators. Intracranial pressure monitoring in patients with acute brain injury in the intensive care unit (SYNAPSE-ICU): an international, prospective observational cohort study. *Lancet Neurol.* 2021;20:548-58.
- 2 Carney N, Totten AM, O'Reilly C, Ullman JS, Hawryluk GW, Bell MJ, et al. Guidelines for the Management of Severe Traumatic Brain Injury, Fourth Edition. *Neurosurgery.* 2017;80:6-15.

- 3 Chesnut RM, Temkin N, Carney N, Dikmen S, Rondina C, Videtta W et al; Global Neurotrauma Research Group. A trial of intracranial-pressure monitoring in traumatic brain injury. *N Engl J Med.* 2012;367:2471-81.
- 4 Avila-Hilari A, Avellanas-Chavala ML. Ultrasonografía del diámetro de la vaina del nervio óptico a gran altitud (3.650-4.150 m) en nativos sanos. *Rev Esp Urg Emerg.* 2025;4:30-3.
- 5 Robba C, Picetti E, Vásquez-García S, Abulhasan YB, Ain A, Adeleye AO, et al. The Brussels consensus for non-invasive ICP monitoring when invasive systems are not available in the care of TBI patients (the B-ICONIC consensus, recommendations, and management algorithm). *Intensive Care Med.* 2025;51:4-20.
- 6 Llompart-Pou JA, Galarza L, Amaya-Villar R, Godoy DA. Transcranial sonography in the critical patient. *Med Intensiva.* 2024;48:165-73.
- 7 Ainslie PN, Subudhi AW. Cerebral blood flow at high altitude. *High Alt Med Biol.* 2014;15:133-40.
- 8 Avellanas Chavala ML. A journey between high altitude hypoxia and critical patient hypoxia: What can it teach us about compression and the management of critical disease? *Med Intensiva.* 2018;42:380-90.
- 9 Tamagnone F, Luna E, Queti N. Duplex transcranial. En: Tamagnone F, Previgliano I, Merlp P, Benay C, editors. POCUS, I. Manual práctico. Ultrasonografía crítica. 2nd ed. Buenos Aires, Argentina: Corpus Editorial; 2021. pp. 71-95.
- 10 Scherle Matamoros CE, Rivero Rodríguez D. Transcranial Doppler ultrasound measurements of cerebral hemodynamic parameters in healthy volunteers at 2850 meters altitude. *Radiologia.* 2019;61:405-11.
- 11 Appenzeller O, Passino C, Roach R, Gamboa J, Gamboa A, Bernardi L, et al. Cerebral vasoreactivity in Andeans and headache at sea level. *J Neurol Sci.* 2004;219:101-6.
- 12 Schöning M, Buchholz R, Walter J. Comparative study of transcranial color duplex sonography and transcranial Doppler sonography in adults. *J Neurosurg.* 1993;78:776-84.

# Avance online de artículo en prensa

**Filiación de los autores:** <sup>1</sup>Unidad de Terapia Intensiva, Hospital Municipal Boliviano Holandés, El Alto, Bolivia. <sup>2</sup>Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. <sup>3</sup>Máster en Medicina de Urgencia y Rescate en Montaña, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España. <sup>4</sup>Comité de Expertos de Medicina Crítica en la Altitud de la Federación Panamericana e Ibérica de Medicina Crítica y Terapia Intensiva (FEPIMCTI), Ciudad de Panamá, Panamá.

**Correo electrónico:** mlavellanas@gmail.com

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran no tener conflictos de intereses en relación con el presente artículo.

**Contribución de los autores, financiación y responsabilidades éticas:** Todos los autores han confirmado su autoría, la no existencia de financiación externa y el mantenimiento de la confidencialidad y respeto de los derechos de los pacientes en el documento de responsabilidades del autor, acuerdo de publicación y cesión de derechos a EMERGENCIAS.

**Artículo no encargado por el Comité Editorial y con revisión externa.**

**Editor responsable:** Xavier Jiménez Fábrega.

**Correspondencia:** Manuel Luis Avellanas Chavala. C/ Los Olivos, 11 - 5º G. 22005 Huesca, España.

**DOI:** xxxx

Avance online de artículo en prensa