

ARTÍCULO ORIGINAL

Correlación entre los parámetros del Doppler transcraneal y el score de Rotterdam en pacientes pediátricos con lesión cerebral traumática: estudio prospectivo

Boris Borja-Zapata¹, Verónica Alaña Peña², Diana Chávez Ruiz², Georgette Borja-Urbano³

¹Servicio de Diagnóstico por Imágenes, Instituto Nacional de Salud del Niño San Borja, Lima 15037, Perú.

²Servicio de UCI Neuroquirúrgica, Instituto Nacional de Salud del Niño San Borja, Lima 15037, Perú.

³Facultad de Medicina Humana, Universidad Ricardo Palma, Lima 15039, Perú.





Citar como:

Borja-Zapata B, Alaña Peña V, Chávez Ruiz D, Borja-Urbano G. Correlación entre los parámetros del Doppler transcraneal y el score de Rotterdam en pacientes pediátricos con lesión cerebral traumática: estudio prospectivo. *Investig Innov Clin Quir Pediatr.* 2026;4(1):20-7. doi: 10.59594/iicqp.2026.v4n1.156

Autor corresponsal:

Boris Borja-Zapata
Teléfono: +51 993411463
Correo electrónico:
bborja@insnsb.gob.pe
bbzunfv@hotmail.com

ORCID iDs

Boris Borja-Zapata
 <https://orcid.org/0000-0002-2507-8563>
Verónica Alaña Peña
 <https://orcid.org/0009-0000-4340-6754>
Diana Chávez Ruiz
 <https://orcid.org/0009-0001-3321-1256>
Georgette Borja-Urbano
 <https://orcid.org/0009-0001-7716-3612>

Recibido : 29/10/2025

Aprobado : 27/01/2026

Publicado : 15/04/2026



Esta es una publicación con licencia de Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

Copyright © 2026, Investigación e Innovación Clínica y Quirúrgica Pediátrica.

RESUMEN

Objetivo: Evaluar la correlación entre los parámetros del Doppler transcraneal (DTC) y el score de Rotterdam (SR) e identificar los factores clínicos y radiológicos asociados con las alteraciones hemodinámicas cerebrales en pacientes pediátricos con lesión cerebral traumática (LCT).

Métodos: Estudio observacional, prospectivo y correlacional realizado en 30 pacientes con LCT. Se recopilaron datos de edad, escala de coma de Glasgow y severidad del trauma (ST) a partir de la historia clínica. Las mediciones hemodinámicas se realizaron mediante DTC durante las primeras 48 horas del ingreso. Se registraron las velocidades de flujo de la arteria cerebral media y de la arteria carótida interna, así como el índice de resistencia, el índice de pulsatilidad y el índice de Lindegaard (IL), bilaterales. Se aplicaron análisis de correlación de Spearman y modelos de regresión lineal múltiple.

Resultados: El IL derecho mostró la correlación positiva más fuerte con el SR ($\rho = 0,52$, $p = 0,002$). El IL derecho fue el parámetro que presentó la asociación estadística más significativa con la ST ($p = 0,002$). En los análisis multivariados ajustados por edad y sexo, el SR ($\beta = 0,52$, $p = 0,045$) y la ST ($\beta = 0,84$, $p = 0,012$) mostraron asociaciones significativas e independientes con el IL derecho.

Conclusiones: El IL derecho se asoció de manera significativa con el SR y con la ST en pacientes pediátricos con LCT. Este hallazgo sugiere que dicho parámetro del DTC podría constituir un potencial marcador hemodinámico en la LCT infantil.

Palabras clave: Ultrasonografía Doppler Transcraneal; Lesiones Traumáticas del Encéfalo; Escala de Coma de Glasgow; Arteria Cerebral Media; Arteria Carótida Interna (Fuente: DeCS)

Correlation between transcranial Doppler parameters and the Rotterdam score in pediatric patients with traumatic brain injury: a prospective study

ABSTRACT

Objective: To evaluate the correlation between transcranial Doppler (TCD) parameters and the Rotterdam score (RS) and to identify clinical and radiological factors associated with cerebral hemodynamic alterations in pediatric patients with traumatic brain injury (TBI).

Methods: An observational, prospective, correlational study was conducted in 30 patients with TBI. Data on age, Glasgow Coma Scale, and trauma severity (TS) were obtained from medical records. Hemodynamic measurements were performed using TCD within the first 48 hours after admission. Flow velocities of the middle cerebral artery and the internal carotid artery were recorded, along with the resistance index, pulsatility index, and Lindegaard index (LI), measured bilaterally. Spearman's correlation analyses and multiple linear regression models were applied.

Results: The right LI showed the strongest positive correlation with the RS ($\rho = 0.52$, $p = 0.002$). The right LI was also the parameter most significantly associated with TS ($p = 0.002$). In multivariate analyses adjusted for age and sex, RS ($\beta = 0.52$, $p = 0.045$) and TS ($\beta = 0.84$, $p = 0.012$) showed significant and independent associations with the right LI.

Conclusions: The right LI was significantly associated with both the RS and TS in pediatric patients with TBI. This finding suggests that this TCD parameter may represent a potential hemodynamic marker in pediatric TBI.

Keywords: Transcranial Doppler Ultrasonography; Brain Injuries, Traumatic; Glasgow Coma Scale; Middle Cerebral Artery; Internal Carotid Artery (Source: MeSH)

INTRODUCCIÓN

La lesión cerebral traumática (LCT) es actualmente una causa importante de discapacidad neurológica y de muerte en los pacientes pediátricos (1). Un estudio epidemiológico multinacional reveló una incidencia de 47 a 280 casos por 100 000 niños por año, siendo los menores de 2 años y los adolescentes los grupos de mayor incidencia a consecuencia de traumas de tipo accidente de tránsito y caídas accidentales (2).

El abordaje y monitoreo de los pacientes con LCT requiere la comprensión de las bases fisiopatológicas de la presión intracraneal (PIC) y la presión de perfusión cerebral (PPC) durante este evento crítico (3,4). En este caso, el neuromonitoreo invasivo tradicional presenta riesgos potenciales como la mala posición del sensor intraventricular, hemorragia e infección, no siempre está disponible ni resulta factible en todos los pacientes pediátricos. En contraste, el Doppler transcraneal (DTC) es un recurso de imagen no invasivo, reproducible y de fácil acceso, que puede evaluar de manera indirecta las fluctuaciones en el flujo sanguíneo del cerebro y las alteraciones hemodinámicas que ocurren como consecuencia del trauma (5).

Desde hace más de tres décadas se han realizado múltiples estudios que han demostrado la posibilidad de medir velocidades del flujo sanguíneo cerebral a través del cráneo utilizando las diferentes ventanas óseas (6-9). Las primeras investigaciones que desarrollaron el uso del DTC en pacientes pediátricos con trauma cerebral comenzaron a partir de la década de los 2000 con el estudio de Mander et al. (10), quienes encontraron una correlación significativa entre las variaciones del flujo sanguíneo evaluadas con DTC y el estado neurológico en pacientes con LCT. Otras investigaciones similares como la de Figaji et al. (11) observaron una correlación fuerte entre la PPC y el índice de pulsatilidad (IP); sin embargo, el IP no fue un indicador fiable de la PIC en niños con LCT. Del mismo modo, O'Brien et al. (12) encontraron que un IP de la arteria cerebral media (ACM) > 1,3 en las primeras 24 horas posteriores a la lesión, presentaba una buena sensibilidad y especificidad para predecir una PIC ≥ 20 mmHg.

Se ha establecido que los valores flujométricos del DTC pueden predecir el riesgo de sufrir resultados neurológicos adversos posterior al evento traumático (13,14) y esclarecer el mecanismo fisiopatológico subyacente al trauma (15). Otras utilidades del DTC en las unidades de cuidados neurocríticos incluyen la valoración de la autorregulación cerebrovascular, la evaluación del vasoespasma en los

accidentes cerebrovasculares, la valoración hemodinámica en las infecciones del sistema nervioso central y el apoyo diagnóstico en casos de muerte cerebral (16).

En la evaluación del paciente pediátrico con LCT, las imágenes intracraneales son fundamentales para valorar la magnitud del daño ocasionado. La tomografía computarizada (TC) es la herramienta que permite valorar las lesiones intracraneales que puedan requerir tratamiento inmediato y se debe utilizar la dosis más baja razonable (17). Actualmente, se utiliza el score de Rotterdam (SR) como predictor de la mortalidad y del pronóstico del paciente con LCT a través de la imagen tomográfica (18). Este score incorpora algunos elementos del score de Marshall (19); sin embargo, a diferencia de este último, reconoce el pronóstico más favorable asociado con los hematomas epidurales y agrega como factor agravante la presencia de lesiones hemorrágicas intracerebrales y subaracnoideas. Se ha descrito en estudios previos la utilidad del SR en la valoración del trauma cerebral en niños con una buena predicción del riesgo tanto de la mortalidad como la necesidad de cirugía y cuidados intensivos (20,21).

Hasta el momento, no se han identificado estudios nacionales que exploren la asociación entre los parámetros del DTC y la evaluación del daño estructural cerebral en pacientes pediátricos que hayan sufrido LCT. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo principal determinar la correlación entre los parámetros obtenidos mediante el DTC y la severidad estructural de la LCT, evaluada con el SR, en un grupo de pacientes de un hospital pediátrico de referencia nacional en Lima, Perú.

MÉTODOS

Diseño del estudio

El presente estudio fue de tipo observacional, prospectivo, analítico y correlacional.

Población y muestra

Se incluyeron mediante un muestreo consecutivo a todos los pacientes menores de 17 años, 11 meses y 29 días atendidos en el Instituto Nacional de Salud del Niño San Borja que ingresaron al Servicio de Emergencia por presentar LCT. Se excluyeron a los pacientes con patologías cardíacas o pulmonares bajo tratamiento farmacológico crónico, patologías congénitas cerebrales relacionadas a anomalías de tipo vascular, procesos neoplásicos concomitantes, cirrosis hepática u otras patologías que alteraran la perfusión cerebral normal. El periodo de recolección de datos fue de 12 meses consecutivos, entre octubre del 2024 a septiembre del 2025.

Procedimientos

Todos los pacientes seleccionados fueron evaluados mediante ultrasonografía DTC durante las primeras 48 horas posteriores al ingreso a la unidad de cuidados intensivos. Se realizó una única medición por paciente. Se utilizó como referencia el Protocolo de Neuroecografía de la Sociedad y Fundación Española de Cuidados Intensivos Pediátricos (22).

Este protocolo contempla la medición de las velocidades de flujo en diferentes arterias cerebrales, ajustadas por edad. Se realizó la insonación de la ACM derecha e izquierda a través de la ventana transtemporal, utilizando un transductor de baja frecuencia (2–5 MHz). La insonación de la arteria carótida interna (ACI) extracraneal derecha e izquierda se efectuó mediante la exploración de la región cervical con un transductor de alta frecuencia (10–12 MHz). En cada caso, se seleccionó la profundidad y el ángulo de insonación adecuados para obtener la velocidad media de flujo más alta y la mejor forma de la onda pulsátil.

Las mediciones se realizaron utilizando un ecógrafo portátil SonoScape, modelo S8 Exp, por un radiólogo especialista en imágenes pediátricas con amplia experiencia en DTC. Esta estrategia metodológica se adoptó para reducir la variabilidad interobservador, reconocida como una de las principales fuentes de error en el DTC. Aunque no se realizó un análisis formal de concordancia intraobservador, la literatura describe una elevada reproducibilidad del DTC cuando es efectuado por operadores experimentados, lo que respalda la fiabilidad de los datos (23).

Variables

Se recopilaron datos de los parámetros obtenidos mediante el DTC, los cuales constituyeron las variables dependientes del estudio. Estos incluyeron la velocidad de la ACM, velocidad de la arteria carótida interna (ACI), IP, índice de resistencia (IR), así como el ratio entre las velocidades medias de la ACM y la ACI (índice de Lindegaard - IL), en ambos lados (derecho e izquierdo).

La severidad estructural de la LCT, considerada como variable predictora, se evaluó mediante la tomografía cerebral obtenida al ingreso, utilizando el SR. El SR incluye cuatro elementos con puntuación independiente: 1) grado de compresión de la cisterna basal, 2) grado de desplazamiento de la línea media, 3) presencia de hematomas epidurales y 4) hemorragia intraventricular o subaracnoidea (18). Su puntuación varía de 1 a 6, donde los valores más altos indican un mayor compromiso estructural cerebral.

Adicionalmente, se consideraron como variables confusoras la edad, el sexo, la escala de coma de Glasgow (ECG) y la severidad del trauma (ST). La ECG mide el nivel de conciencia en pacientes con lesión cerebral y presenta puntajes entre 3 (estado más grave) y 15 (función normal). La ST fue clasificada según la ECG como leve (ECG 13–15), moderada (ECG 9–12) y severa (ECG 3–8).

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó el programa SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), versión 25.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA). Las variables categóricas fueron reportadas como frecuencias absolutas y porcentajes. Las variables continuas se expresaron como media \pm desviación estándar (DE), rango intercuartílico (RIC), valor máximo y valor mínimo.

Se evaluó la normalidad de las variables cuantitativas mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene. Para analizar las asociaciones entre los parámetros obtenidos mediante el DTC (velocidad de la ACM, velocidad de la ACI, IP, IR e IL) y el SR, se utilizó la prueba de correlación de Spearman (ρ). Para las comparaciones entre las categorías de la ST se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis. Finalmente, se realizaron regresiones lineales múltiples con errores robustos (HC3), a fin de ajustar los efectos de las covariables clínicas y radiológicas sobre cada parámetro obtenido mediante Doppler y corregir posibles problemas de heterocedasticidad. En todas las pruebas se consideró un nivel de significancia estadística de $p < 0,05$.

Aspectos éticos

Todos los participantes incluidos en la investigación contaron con el consentimiento informado otorgado por los padres o tutores.

El estudio se realizó conforme a los principios éticos de la Declaración de Helsinki. Los instrumentos de recolección de datos fueron llenados estrictamente por los investigadores, garantizando en todo momento el anonimato y la confidencialidad de la información.

Esta investigación fue aprobada por el Comité Institucional de Ética en Investigación del Instituto Nacional de Salud del Niño de San Borja (código PI-885).

RESULTADOS

Se recolectó información de 30 pacientes, de los cuales 17 fueron varones (56,7 %). La edad promedio fue de 5,70 años con un rango de 1 a 13 años. Ningún paciente presentó una ST leve. Veinte pacientes (66,7 %) presentaron una ST de tipo grave, de los cuales 12 pacientes (60,0 %) fueron varones. El análisis descriptivo de las variables cuantitativas se muestra en la Tabla 1.

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la correlación entre los parámetros del DTC y el SR. El IL derecho mostró la correlación positiva más fuerte con el SR ($\rho = 0,52$, $p = 0,002$). Otras variables, como la velocidad pico sistólica (VPS) de la ACM izquierda, la ACM derecha, la ACI izquierda y la ACI derecha, mostraron correlaciones débiles pero significativas con el SR. El análisis de Kruskal-Wallis evidenció diferencias estadísticamente significativas en algunos parámetros del DTC según las categorías de ST: IL derecho ($p = 0,002$), la VPS de la ACM izquierda ($p = 0,004$) y la VPS de la ACM derecha ($p = 0,040$) (Tabla 3).

En el análisis de regresión se utilizó el IL derecho como variable dependiente debido a que mostró la mayor correlación con el SR. El modelo explicó el 28 % de la variabilidad del IL derecho. Aunque el SR no alcanzó significancia estadística ($p = 0,999$), probablemente debido a la alta colinealidad con la ST (VIF = 19,28 y 21,70, respectivamente), las variables edad, sexo masculino y ST mostraron asociaciones positivas significativas con el IL derecho (Tabla 4).

Tabla 1. Análisis descriptivo de la edad, ECG, los parámetros del DTC y el SR

Parámetros del DTC	Media	DE	RIC	Mínimo	Máximo
Edad (años)	5,70	3,10	3,25–7,00	1,00	13,00
ECG	8,10	1,40	8,00–9,00	4,00	11,00
ACM-D VPS (cm/s)	149,91	50,00	114,40–190,80	74,80	243,30
ACM-D IR	0,74	0,09	0,65–0,81	0,57	0,88
ACM-D IP	1,50	0,37	1,15–1,76	0,92	2,13
ACM-I VPS (cm/s)	169,34	48,10	135,50–203,80	59,30	248,60
ACM-I IR	0,75	0,09	0,69–0,82	0,54	0,85
ACM-I IP	1,54	0,33	1,27–1,80	0,84	1,96
ACI-D VPS (cm/s)	78,50	24,30	59,00–97,40	23,30	123,80
ACI-D IR	0,75	0,07	0,69–0,80	0,59	0,86
ACI-D IP	1,52	0,28	1,28–1,70	0,97	2,02
ACI-I VPS (cm/s)	74,70	25,70	54,50–89,20	30,60	144,40
ACI-I IR	0,74	0,08	0,65–0,82	0,62	0,85
ACI-I IP	1,51	0,32	1,15–1,80	1,06	1,96
IL D	2,13	1,10	1,30–2,93	0,74	5,09
IL I	2,46	0,96	1,87–3,00	0,95	4,31
SR	3,90	0,90	3,00–4,75	3,00	6,00

DTC: Doppler transcraneal; ECG: escala de coma de Glasgow; ACM: arteria cerebral media; ACI: arteria carótida interna; VPS: velocidad pico sistólica; IR: índice de resistencia; IP: índice de pulsatilidad; IL: índice de Lindegaard; D: derecha; I: izquierda; SR: score de Rotterdam; DE: desviación estándar; RIC: rango intercuartílico.

Tabla 2. Correlación de Spearman entre el SR y parámetros del DTC

Variable	ρ	p
IL D	0,52	0,002
ACM-I VPS	0,49	0,006
ACM-D VPS	0,43	0,018
ACI-I VPS	0,39	0,032
ACI-D VPS	0,39	0,035
ACM-I IP	0,34	0,068
ACM-D IP	0,32	0,086
ACM-I IR	0,31	0,101
ACM-D IR	0,30	0,124
IL I	0,29	0,136
ACI-I IP	0,27	0,169
ACI-D IP	0,26	0,190
ACI-I IR	0,25	0,217
ACI-D IR	0,23	0,264

ACM: arteria cerebral media; ACI: arteria carótida interna; VPS: velocidad pico sistólica; IR: índice de resistencia; IP: índice de pulsatilidad; IL: índice de Lindegaard; D: derecha; I: izquierda; ρ : coeficiente de correlación de Spearman.

Tabla 3. Prueba de Kruskal-Wallis entre ST y parámetros del DTC

Variable	H	p
IL D	9,35	0,002
ACM-I VPS	8,48	0,004
ACM-D VPS	6,43	0,040
ACI-I VPS	5,16	0,023
ACI-D VPS	5,02	0,025
ACM-I IP	2,63	0,268
ACM-D IP	2,21	0,331
ACM-I IR	1,98	0,369
ACM-D IR	1,74	0,419
IL I	1,60	0,449
ACI-I IP	1,40	0,498
ACI-D IP	1,22	0,543
ACI-I IR	1,12	0,572
ACI-D IR	0,94	0,624

ACM: arteria cerebral media; ACI: arteria carótida interna; VPS: velocidad pico sistólica; IR: índice de resistencia; IP: índice de pulsatilidad; IL: índice de Lindegaard; D: derecha; I: izquierda; H: estadístico de Kruskal-Wallis.

Tabla 4. Modelo de regresión lineal múltiple para el IL derecho

Variable independiente	β	Error estándar	IC 95 %	p	VIF
Constante	0,79	0,37	0,03–1,55	0,041	-
SR	0,00	0,31	-0,63–0,63	0,999	19,28
Edad (años)	0,32	0,15	0,02–0,62	0,037	3,87
Sexo (masculino = 1)	1,00	0,47	0,02–1,97	0,045	2,60
ST	0,87	0,33	0,17–1,57	0,017	21,70

Errores estándar calculados con el método robusto (HC3). Estadísticos del modelo: R^2 ajustado = 0,280; F (global) = 3,27; p = 0,031; n = 30 pacientes. SR: score de Rotterdam; ST: severidad del trauma; VIF: factor de inflación de la varianza.

Los valores elevados del factor de inflación de la varianza (VIF >10) para el SR y la ST indicaron colinealidad importante entre ambas variables. Por este motivo, se determinó no incluirlas simultáneamente en el mismo modelo y se propusieron dos modelos alternativos:

En el primer modelo se empleó únicamente el SR como predictor principal, excluyendo la variable ST (Tabla 5). Se observó una asociación significativa entre el SR y el IL derecho, luego de ajustar por edad y sexo. No se detectó colinealidad importante entre las variables (VIF < 5), lo que sugiere que el modelo presenta mayor estabilidad estadística.

Por otro lado, el segundo modelo empleó la ST como predictor principal, excluyendo el SR (Tabla 6). En este modelo, la ST mostró una asociación significativa con el IL derecho, luego de ajustar por la edad y sexo. De forma similar al modelo anterior, no se evidenció colinealidad relevante (VIF < 5) entre las variables, lo que respalda la estabilidad estadística del modelo.

Tabla 5. Modelo de regresión lineal múltiple para el IL derecho sin la variable ST

Variable independiente	β	Error estándar	IC 95 %	p	VIF
Constante	0,66	0,41	-0,20–1,52	0,127	-
SR	0,52	0,25	0,01–1,02	0,045	3,20
Edad (años)	0,30	0,14	0,02–0,59	0,039	2,91
Sexo (masculino = 1)	0,86	0,40	0,03–1,69	0,043	1,88

Errores estándar calculados con el método robusto (HC3). Estadísticos del modelo: R^2 ajustado = 0,312; F (global) = 3,86; p = 0,019; n = 30 pacientes. SR: score de Rotterdam; VIF: factor de inflación de la varianza.

Tabla 6. Modelo de regresión lineal múltiple para el IL derecho sin la variable SR

Variable independiente	β	Error estándar	IC 95 %	p	VIF
Constante	0,70	0,38	-0,08–1,49	0,076	-
ST	0,84	0,30	0,22–1,48	0,012	2,65
Edad (años)	0,29	0,14	0,00–0,58	0,048	2,72
Sexo (masculino = 1)	0,89	0,41	0,02–1,76	0,047	1,95

Errores estándar calculados con el método robusto (HC3). Estadísticos del modelo: R^2 ajustado = 0,326; F (global) = 3,98; p = 0,017; n = 30 pacientes. ST: severidad del trauma; VIF: factor de inflación de la varianza.

DISCUSIÓN

En esta investigación se examinó la asociación entre parámetros obtenidos mediante el DTC y el grado de daño estructural cerebral medido mediante el SR. Los resultados evidenciaron una correlación significativa entre el IL del lado derecho y el SR. Asimismo, el IL derecho fue el parámetro del DTC que se asoció más fuertemente con la ST mediante el análisis de Kruskal-Wallis. En los análisis multivariados ajustados por edad y sexo, tanto el SR como la ST constituyeron predictores independientes del IL derecho. Estos hallazgos refuerzan la utilidad de combinar las mediciones hemodinámicas cerebrales con las escalas imagenológicas para optimizar el abordaje terapéutico y pronóstico en el contexto de una LCT en la población pediátrica.

Diversos estudios previos han señalado que el DTC constituye una herramienta no invasiva útil para monitorizar el flujo cerebral, detectar vasoespasmos y valorar la autorregulación en trauma craneoencefálico pediátrico (24-26). En particular, los índices derivados del flujo, como las velocidades de la ACM y de la ACI, han sido descritos en la literatura como posibles marcadores de gravedad y desenlace clínico. Asimismo, se ha documentado que la relación entre la velocidad media de la ACM y la velocidad media de la ACI, conocida como IL, permite diferenciar la hiperemia del vasoespasmos en pacientes con trauma cerebral (27). Resultados similares fueron descritos en un estudio prospectivo planteado por O'Brien NF *et al.* (28), quienes identificaron una proporción significativa de pacientes pediátricos que desarrollaba vasoespasmos durante el curso de una LCT, a partir de mediciones de los parámetros del DTC, como la ACM y el IL. Por otro lado, en otro estudio del mismo grupo (12), los autores demostraron que un IP de la ACM > 1,3 se asociaba con una elevada presión intracraneal, mostrando una alta sensibilidad y especificidad en las primeras 24 horas posteriores al trauma cerebral.

El hallazgo obtenido en el presente estudio donde el IL derecho se asocia significativamente con el SR consolida esta línea de evidencia (29) y adiciona un elemento importante: la integración de la dimensión anatómico-estructural, evaluada a través de la imagen radiológica, con la hemodinámica cerebral en pacientes pediátricos. En este contexto, el IL derecho mostró un mayor valor clínico predictivo respecto al daño estructural cerebral, mostrando una correlación más estrecha con escalas radiológicas como el SR. Hallazgos similares fueron descritos por van Santbrink H *et al.* (30) quienes observaron en pacientes con LCT, evaluados mediante imágenes radiológicas y DTC, que la disminución del flujo de la velocidad cerebral media, junto con el incremento simultáneo del IL y el IP en las primeras 8 horas posteriores al trauma, se asociaban con áreas de mayor compromiso cerebral correspondientes a isquemia.

La asociación observada con el IL derecho constituye un hallazgo del presente estudio, cuya explicación fisiopatológica requiere mayor exploración en investigaciones futuras.

En el análisis multivariado se usó el IL derecho como variable dependiente debido a que fue el marcador más representativo, fisiológicamente dinámico y con la mayor correlación estadística con el SR. Además, su selección permitió evitar la redundancia y la pérdida de potencia estadística que implicaría analizar múltiples parámetros Doppler por separado. Al comparar los modelos multivariados, se observó que al excluir simultáneamente el SR y la ST debido a su alta colinealidad (Modelo 1: usando SR vs Modelo 2: usando ST) se obtuvo un mejor ajuste (R^2 ajustado: 0,312–0,326) y valores de VIF aceptables (<5). Esto sugiere que, en estudios sobre LCT pediátrica, es preferible no incluir simultáneamente múltiples indicadores de gravedad, ya que ello puede saturar el modelo y reducir su precisión. En este sentido, se recomienda emplear modelos parsimoniosos, como los propuestos en este estudio. Finalmente, otro hallazgo para destacar es la asociación de la edad y el sexo masculino con el IL, lo que refuerza sus roles como posibles modificadores fisiológicos del flujo cerebral en función de la madurez vascular.

La relevancia clínica de esta investigación radica en el uso complementario de dos herramientas de evaluación en el manejo de pacientes con LCT en la unidad de cuidados intensivos pediátricos. El SR podría utilizarse en la fase inicial como marcador anatómico de daño, mientras que el IL obtenido mediante DTC actuaría como un marcador dinámico de alteración hemodinámica cerebral. En este contexto, un paciente con SR e IL elevados podría beneficiarse de monitorización intensiva y terapias dirigidas para optimizar la perfusión cerebral.

Sin embargo, deben considerarse algunas limitaciones al momento de interpretar los hallazgos de este estudio. Primero, el tamaño muestral del presente estudio ($n = 30$) responde al carácter exploratorio del mismo y a los criterios clínicos y técnicos restrictivos utilizados para la selección de la cohorte. Esta estuvo conformada por pacientes pediátricos con LCT que contaban simultáneamente con tomografía computarizada evaluable mediante el SR y mediciones completas de DTC. Este perfil clínico específico limita de manera natural el número de casos disponibles, una situación frecuente en estudios que evalúan DTC en población pediátrica con trauma craneoencefálico. Segundo, las mediciones de los parámetros del DTC fueron puntuales y no longitudinales, lo que impide evaluar su evolución temporal o su respuesta a intervenciones terapéuticas. Estudios previos con diseños multicéntricos y seguimiento longitudinal han permitido describir la asociación entre el IL y la incidencia de vasoespasmos en pacientes pediátricos con LCT (28,31). Tercero, únicamente el IL derecho mostró una correlación significativa con el SR, hallazgo que podría explicarse por la asimetría hemodinámica cerebral que ocurre tras el trauma, donde el flujo sanguíneo se altera preferentemente en el hemisferio ipsilateral a la lesión estructural o al edema dominante. Estudios previos (12,24,32) han descrito esta variabilidad lateral en el flujo de la ACM. Cuarto, se observó colinealidad entre el SR y la ST cuando ambas variables se incluyeron simultáneamente en el modelo, fenómeno previamente reportado en estudios que incorporan múltiples índices de gravedad y radiológicos (20). Quinto, la cohorte no incluyó pacientes con LCT leve. Esta situación responde a criterios clínicos y asistenciales más que a un sesgo de selección, ya que en la práctica hospitalaria el DTC se utiliza predominantemente en pacientes con trauma craneoencefálico moderado a severo, mientras que los casos leves suelen presentar hallazgos tomográficos y hemodinámicos normales. En consecuencia, los resultados del presente estudio son aplicables principalmente a pacientes pediátricos con LCT moderada y severa, lo que limita su extrapolación al espectro completo de la LCT pediátrica.

CONCLUSIÓN

En esta cohorte de pacientes pediátricos con LCT, los parámetros del DTC se correlacionaron con el SR, destacando el IL derecho como el marcador hemodinámico más fuertemente asociado con la gravedad estructural del daño cerebral observada mediante tomografía. Asimismo, el IL derecho fue el parámetro que presentó la asociación estadística más significativa con la ST. En los modelos

multivariados ajustados por edad y sexo, tanto el SR como la ST se asociaron significativamente con el IL derecho. Estos hallazgos respaldan el valor del DTC como herramienta no invasiva complementaria en la evaluación hemodinámica y pronóstica de la LCT pediátrica.

A futuro, se recomienda replicar estos resultados en cohortes pediátricas más amplias y multicéntricas, incorporar mediciones seriadas de DTC que permitan evaluar la evolución temporal del IL y su relación con los desenlaces neurológicos a mediano plazo, así como determinar puntos de corte óptimos del IL específicos para la población pediátrica.

Contribuciones de autoría

Boris Borja Zapata: conceptualización, investigación, metodología, administración del proyecto, supervisión, validación, visualización, revisión y edición.

Verónica Alaña Peña: investigación, validación, visualización, revisión.

Diana Chávez Ruiz: investigación, validación, visualización, revisión.

Georgette Borja Urbano: investigación, validación, visualización, revisión.

Conflictos de interés

Los autores no tienen intereses financieros o no financieros relevantes que declarar.

Financiamiento

El presente estudio no recibió financiamiento externo.

Disponibilidad de datos

Los autores declaran que los datos que sustentan los resultados de esta investigación, incluyendo bases de datos y/o archivos de análisis pueden ser obtenidos previa solicitud al autor corresponsal.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal que labora en la Unidad de Cuidados Intensivos Neuroquirúrgicos, quienes brindaron apoyo constante en la labor de recolección de datos para la presente investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- González Balenciaga M. Traumatismo craneal. *Protoc Diagn Ter Pediatr* [Internet]. 2020 [citado el 22 de diciembre de 2025];1:233-45. Disponible en: https://static.aeped.es/18_traumatismo_craneal_9c5b1811db.pdf
- Dewan MC, Mummareddy N, Wellons JC 3rd, Bonfield CM. Epidemiology of Global Pediatric Traumatic Brain Injury: Qualitative Review. *World Neurosurg*. 2016;91:497-509.e1. doi: 10.1016/j.wneu.2016.03.045
- Figaji A. An update on pediatric traumatic brain injury. *Childs Nerv Syst*. 2023;39(11):3071-81. doi: 10.1007/s00381-023-06173-y
- Ha EJ. Pediatric Severe Traumatic Brain Injury: Updated Management. *J Korean Neurosurg Soc*. 2022;65(3):354-60. doi: 10.3340/jkns.2021.0308
- Lovett ME, O'Brien NF. Transcranial Doppler Ultrasound, a Review for the Pediatric Intensivist. *Children (Basel)*. 2022;9(5):727. doi: 10.3390/children9050727
- Aaslid R, Markwalder TM, Nornes H. Noninvasive transcranial Doppler ultrasound recording of flow velocity in basal cerebral arteries. *J Neurosurg*. 1982;57(6):769-74. doi: 10.3171/jns.1982.57.6.0769
- Saunders FW, Cledgett P. Intracranial blood velocity in head injury. A transcranial ultrasound Doppler study. *Surg Neurol*. 1988;29(5):401-9. doi: 10.1016/0090-3019(88)90049-3
- Czosnyka M, Smielewski P, Kirkpatrick P, Laing RJ, Menon D, Pickard JD. Continuous assessment of the cerebral vasomotor reactivity in head injury. *Neurosurgery*. 1997;41(1):11-9. doi: 10.1097/00006123-199707000-00005
- Schmidt B, Klingelhöfer J, Schwarze JJ, Sander D, Wittich I. Noninvasive prediction of intracranial pressure curves using transcranial Doppler ultrasonography and blood pressure curves. *Stroke*. 1997;28(12):2465-72. doi: 10.1161/01.str.28.12.2465
- Mandera M, Larysz D, Wojtacha M. Changes in cerebral hemodynamics assessed by transcranial Doppler ultrasonography in children after head injury. *Childs Nerv Syst*. 2002;18(3-4):124-8. doi: 10.1007/s00381-002-0572-5
- Figaji AA, Zwane E, Fieggen AG, Siesjo P, Peter JC. Transcranial Doppler pulsatility index is not a reliable indicator of intracranial pressure in children with severe traumatic brain injury. *Surg Neurol*. 2009;72(4):389-94. doi: 10.1016/j.surneu.2009.02.012
- O'Brien NF, Maa T, Reuter-Rice K. Noninvasive screening for intracranial hypertension in children with acute, severe traumatic brain injury. *J Neurosurg Pediatr*. 2015;16(4):420-5. doi: 10.3171/2015.3.PEDS14521
- Moreno JA, Mesalles E, Gener J, Tomasa A, Ley A, Roca J, et al. Evaluating the outcome of severe head injury with transcranial Doppler ultrasonography. *Neurosurg Focus*. 2000;8(1):e8. doi: 10.3171/foc.2000.8.1.1702
- Trabold F, Meyer PG, Blanot S, Carli PA, Orliaguet GA. The prognostic value of transcranial Doppler studies in children with moderate and severe head injury. *Intensive Care Med*. 2004;30(1):108-12. doi: 10.1007/s00134-003-2057-8
- Deana C, Vetrugno L, Stefani F, Bassi F, Bove T. Transcranial Doppler in a child: A most valuable imaging modality. *Ultrasound*. 2022;30(2):167-72. doi: 10.1177/1742271X21998059
- LaRovere KL, O'Brien NF. Transcranial Doppler Sonography in Pediatric Neurocritical Care: A Review of Clinical Applications and Case Illustrations in the Pediatric Intensive Care Unit. *J Ultrasound Med*. 2015;34(12):2121-32. doi: 10.7863/ultra.15.02016
- O'Brien WT Sr, Caré MM, Leach JL. Pediatric Emergencies: Imaging of Pediatric Head Trauma. *Semin Ultrasound CT MR*. 2018;39(5):495-514. doi: 10.1053/j.sult.2018.01.007

18. Maas AI, Hukkelhoven CW, Marshall LF, Steyerberg EW. Prediction of outcome in traumatic brain injury with computed tomographic characteristics: a comparison between the computed tomographic classification and combinations of computed tomographic predictors. *Neurosurgery*. 2005;57(6):1173-82. doi: 10.1227/01.neu.0000186013.63046.6b
19. Marshall LF, Marshall SB, Klauber MR, Van Berkum Clark M, Eisenberg HM, Jane JA, et al. A new classification of head injury based on computerized tomography. *J Neurosurg*. 1991;75 Suppl:S14-20. doi:10.3171/sup.1991.75.1s.0s14
20. Liesemer K, Riva-Cambrin J, Bennett KS, Bratton SL, Tran H, Metzger RR, et al. Use of Rotterdam CT scores for mortality risk stratification in children with traumatic brain injury. *Pediatr Crit Care Med*. 2014;15(6):554-62. doi: 10.1097/PCC.000000000000150
21. Katar S, Aydin Ozturk P, Ozel M, Kizilgun M, Karakurt C, Ozturk E, et al. The Use of Rotterdam CT Score for Prediction of Outcomes in Pediatric Traumatic Brain Injury Patients Admitted to Emergency Service. *Pediatr Neurosurg*. 2020;55(5):237-43. doi: 10.1159/000510016
22. Sociedad Española de Cuidados Intensivos Pediátricos. Protocolo de neuroecografía: ecografía Doppler transcraneal, evaluación de la desviación de línea media, diámetro de la vaina del nervio óptico y evaluación de reflejos pupilares [Internet]. Madrid: SEICP; 2023 [citado el 22 de diciembre de 2025]. Disponible en: <https://secip.info/images/uploads/2020/07/Neuroecograf%C3%ADa-en-pediatr%C3%ADa.pdf>
23. Rojanapongpun P, Morrison B, Drance SM. Reproducibility of transcranial Doppler ultrasound examinations of the ophthalmic artery flow velocity. *Br J Ophthalmol*. 1993;77(1):22-4. doi: 10.1136/bjo.77.1.22
24. Reuter-Rice K, Schmitt D, Sweeney J, Walker C, Hughes S, Gonzalez R, et al. Transcranial Doppler Ultrasound Use in Pediatric Traumatic Brain Injury. *Pediatr Crit Care Med*. 2017;18(12):1123-31. doi: 10.1097/PCC.0000000000001320
25. Fatima N, Al Rumaihi G, Shuaib A, Saqqur M, Qureshi AI, Khan M, et al. The Role of Transcranial Doppler in Traumatic Brain Injury: A Comprehensive Review. *J Neurotrauma*. 2019;36(3):478-90. doi: 10.1089/neu.2018.5894
26. Liesemer K, Bennett TD, Bratton SL, Riva-Cambrin J, Metzger RR, Tran H, et al. Use of Rotterdam CT Score for Mortality Risk Stratification in Children with Severe Traumatic Brain Injury. *J Neurotrauma*. 2014;31(18):1526-33. doi: 10.1089/neu.2014.3451
27. Aaslid R. Transcranial Doppler assessment of cerebral vasospasm. *Eur J Ultrasound*. 2002;16(1-2):3-10. doi: 10.1016/s0929-8266(02)00045-9
28. O'Brien NF, Zhang X, Jones B, Reuter-Rice K, Walker C, Schmitt D, et al. Vasospasm and Transcranial Doppler in Pediatric Head Injury: A Prospective Study. *Childs Nerv Syst*. 2010;26(8):1059-66. doi: 10.1007/s00381-010-1077-6
29. Schiro B, Hasan M, Bryce Y, Peña C. Intracranial and Extracranial Evaluation. *Tech Vasc Interv Radiol*. 2022;25(4):100862. doi: 10.1016/j.tvir.2022.100862
30. Van Santbrink H, Schouten JW, Steyerberg EW, Avezaat CJ, Maas AI. Serial transcranial Doppler measurements in traumatic brain injury with special focus on the early posttraumatic period. *Acta Neurochir (Wien)*. 2002;144(11):1141-9. doi: 10.1007/s00701-002-1012-8
31. Gomez A, Kim J, Reuter-Rice K, Vavilala MS, O'Brien NF, Figaji A, et al. Transcranial Doppler-Based Cerebrovascular Reactivity Indices in Children: A Scoping Review. *Front Pharmacol*. 2021;12:690921. doi: 10.3389/fphar.2021.690921
32. Deines JJ, Chang J, Reuter-Rice K. Cerebral Blood Flow Velocities and Functional Outcomes in Pediatric Mild Traumatic Brain Injury. *J Neurotrauma*. 2019;36(1):135-41. doi: 10.1089/neu.2017.5577