



ORIGINAL

Neuromonitorización y seguimiento en pacientes con cardiopatía congénita en España



Alexandra Belfi^a, Laia Vega^b, Marta Aguar^c, María Carmen Bravo^d, Débora Cañizo^e, Laura Díaz Rueda^f y Marta Camprubí-Camprubí^{e,f,*}, en representación del Grupo de Neuromonitorización del paciente con cardiopatía congénita[◇]

^a Vanderbilt University School of Medicine, Vanderbilt University, Nashville, Estados Unidos

^b Unidad de cuidados intensivos pediátricos y neonatales. Hospital Universitari Dexeus, Grupo Quiron Salud, Barcelona, España

^c Unidad de Neonatología, Hospital Universitario y Politécnico La Fe, Valencia, España

^d Unidad de Neonatología, Hospital La Paz, Madrid, España

^e Servicio Neonatología, BCNatal - Barcelona Center for Maternal Fetal and Neonatal Medicine, Hospital Sant Joan de Déu, Hospital Clínic, Universidad de Barcelona, Barcelona, España

^f ICare4Kits, Grupo de Investigación Cardiovascular, Institut de Recerca Sant Joan de Déu, Barcelona, España

Recibido el 10 de julio de 2024; aceptado el 22 de noviembre de 2024

Disponible en Internet el 18 de diciembre de 2024

PALABRAS CLAVE

Cardiopatía congénita;
Neuromonitorización;
Seguimiento neurológico;
Neuroimagen

Resumen

Introducción: Existe evidencia de la alta incidencia de alteraciones neurológicas en pacientes con cardiopatía congénita (CC). No obstante, en España, las estrategias de neuromonitorización perioperatorias, así como los protocolos de seguimiento, no están estandarizadas.

Objetivo: El objetivo de este estudio es describir las prácticas clínicas actuales en cuanto a neuromonitorización, neuroimagen y seguimiento del neurodesarrollo en pacientes con CC en los hospitales españoles que realizan cirugía cardíaca pediátrica (CCP).

Material y método: Se diseñó una encuesta adaptando un cuestionario previamente desarrollado por *The European Association Brain and Congenital Heart Disease Consortium*, en la que se exploraron aspectos relacionados con la neuromonitorización pericirugía, las técnicas de neuroimagen y el seguimiento neurológico. La encuesta se envió a los 19 hospitales españoles con programa de CCP.

Resultados: De los hospitales contactados, se obtuvo respuesta de 17. El 88% de los centros realizan algún tipo de neuroimagen precirugía y un 81% poscirugía. La ecografía transfontanelar es la técnica más utilizada. El 56% de los centros utilizan alguna estrategia de neuromonitorización intraquirúrgica, siendo la espectroscopia de infrarrojo cercano la más utilizada. Solo el 19% de los centros disponen de un protocolo de seguimiento para estos pacientes y el 13% están en proceso de planificación.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: marta.camprubi@sjd.es (M. Camprubí-Camprubí).

◇ Los miembros del Grupo de Neuromonitorización del paciente con cardiopatía congénita se presentan en el [anexo 1](#).

Conclusiones: Existe una gran heterogeneidad en las prácticas de neuromonitorización, neuroimagen y seguimiento neurológico para pacientes con CC en los centros españoles con CCP. Estos hallazgos subrayan la necesidad de avanzar hacia un consenso que permita estandarizar las estrategias de neuromonitorización y seguimiento neurológico en niños afectados de CC en España.

© 2024 Asociación Española de Pediatría. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la CC BY-NC-ND licencia (<http://creativecommons.org/licencias/by-nc-nd/4.0/>).

KEYWORDS

Congenital heart disease;
Neuromonitoring;
Neurologic followup;
Neuroimaging

Neuromonitoring and followup in patients with congenital heart disease in Spain

Abstract

Introduction: There is evidence of the high incidence of neurological abnormalities in patients with congenital heart disease (CHD). Despite this, perioperative neuromonitoring strategies and long-term followup protocols are not standardized in Spain.

Objective: The aim of our study was to describe current clinical practice in neuromonitoring, neuroimaging and neurodevelopmental followup in patients with CHD in Spanish hospitals that perform paediatric cardiac surgery (PCS).

Material and method: We conducted a survey by adapting a questionnaire originally developed by the European Association Brain and Congenital Heart Disease Consortium to collect data on aspects such as the implementation of perioperative neuromonitoring and the type of neuroimaging techniques and neurological followup performed. The questionnaire was distributed to the 19 Spanish hospitals that perform PCS.

Results: We received responses from 17 centres. Eighty-eight percent performed some type of preoperative neuroimaging and 81% postoperative monitoring. The most widely used technique was transfontanellar sonography. Fifty-six percent of the centres used some form of intraoperative neuromonitoring, most frequently near-infrared spectroscopy. Nineteen percent had an established protocol for the followup of these patients and 13% were in the process of developing it.

Conclusions: There is considerable heterogeneity in neuromonitoring, neuroimaging and neurologic followup practices in the management of patients with CHD in hospitals that perform PCS in Spain. These findings highlight the need to pursue a consensus in order to standardise neuromonitoring and neurologic followup strategies in children with CHD in Spain.

© 2024 Asociación Española de Pediatría. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

La cardiopatía congénita (CC) afecta aproximadamente 1 de cada 100 recién nacidos (RN). En España, anualmente nacen cerca de 4.000 RN con CC, de los cuales un 25% requiere cirugía el primer año de vida¹. Los avances quirúrgicos y en manejo perioperatorio han mejorado las tasas de supervivencia, permitiendo que alrededor del 85% alcance la edad adulta. No obstante, esta mayor supervivencia ha evidenciado una alta prevalencia de alteraciones en el neurodesarrollo²⁻⁵.

Desde la etapa fetal, los pacientes con CC muestran diferencias en el desarrollo cerebral⁶. Un 30% de los RN con CC presentan lesiones de la sustancia blanca (LSB), similares a las observadas en prematuros⁷. Los fetos con CC severas tienen cerebros más inmaduros, lo que incrementa el riesgo de complicaciones neurológicas tras la cirugía o la inestabilidad hemodinámica perioperatoria⁸. Adicionalmente, estas complicaciones neurológicas perioperatorias condicio-

nan una mayor estancia hospitalaria y aumentan el riesgo de alteraciones de neuroconductuales y de aprendizaje⁸⁻¹².

A pesar de que algunos países han implementado guías para el seguimiento neurológico de esta población¹³, en Europa no existe un consenso¹⁴ y en España el seguimiento es heterogéneo.

Con el objetivo de tener una visión global sobre las prácticas actuales, se ha realizado un cuestionario en los centros españoles de cirugía cardíaca pediátrica (CCP), recopilando información sobre neuromonitorización, neuroimagen y protocolos de seguimiento neurológico.

Métodos

Se diseñó un cuestionario adaptado del elaborado por el grupo de trabajo europeo, *The European Association Brain and Congenital Heart Disease Consortium*¹⁴, y se distribuyó a todos los centros españoles con programa de CCP. La recopilación de datos se realizó a través de la plataforma



Figura 1 Mapa que ilustra la distribución geográfica de los 17 centros que respondieron al cuestionario.

REDCap (<https://www.project-redcap.org/>). El cuestionario fue enviado en noviembre de 2023, y las respuestas se recogieron hasta enero de 2024 (material adicional).

Resultados

Información general

El cuestionario se envió a los 19 centros españoles con programa de CCP, de los cuales 17 respondieron (fig. 1).

En 2023, se realizaron un total de 1.781 CCP entre los 17 centros, de las cuales 360 fueron en RN. Un 57,7% se realizaron con circulación extracorpórea (CEC). La distribución de los centros según el número de cirugías realizadas se muestra en la figura 2.

Neuroimagen

La tabla 1 presenta los resultados obtenidos sobre el uso técnicas de neuroimagen (ecografía cerebral [EC], tomografía computarizada [TC] y/o resonancia magnética [RM]), para evaluar el sistema nervioso central antes y después de la CCP.

Evaluación neurológica estructurada (ENE)

Previo a la CCP, el 63% de los centros realizan una evaluación neurológica estructurada (ENE) en RN (p. ej., HINE). En el 40% de los centros, se realiza de forma rutinaria, mientras que en el 50% solo si hay preocupación clínica. El 10% restante la realiza como parte de un protocolo de investigación.

En los centros que realizan la ENE antes de la cirugía (63%), esta también se repite en el postoperatorio: el 30%

de forma rutinaria, el 60% solo ante preocupación clínica y el 10% como parte de un protocolo de investigación.

Neuromonitorización

El 56% de los centros encuestados emplean neuromonitorización en el periodo preoperatorio, utilizándose en todos los centros espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) para medir la saturación regional de oxígeno cerebral (SrcO₂). Un 22% utiliza electroencefalograma convencional (EEG) y el 11% emplea electroencefalograma integrado por amplitud (aEEG) (fig. 3).

Durante la CCP, todos los centros utilizan neuromonitorización. El 94% utiliza NIRS y un 6% adicionalmente aEEG. El 81% emplea el índice biespectral mientras que ningún centro utiliza EEG convencional (fig. 3).

En el postoperatorio inmediato, el 94% de los centros utilizan neuromonitorización. Todos emplean NIRS, el 27% aEEG y el 13% utiliza EEG convencional (fig. 3).

Protocolo de seguimiento en pacientes con cardiopatía congénita (CC)

El 19% de los centros encuestados disponen de un protocolo específico de seguimiento neurológico para pacientes con CC. En dos de estos centros, el protocolo abarca hasta los 2 años de edad, mientras que en otro se extiende hasta los 6 años. Además, dos centros están en proceso de desarrollo de un protocolo.

Discusión

Este artículo presenta los resultados de un cuestionario dirigido a todos los centros españoles que realizan CCP. Los hallazgos revelan una considerable heterogeneidad en la

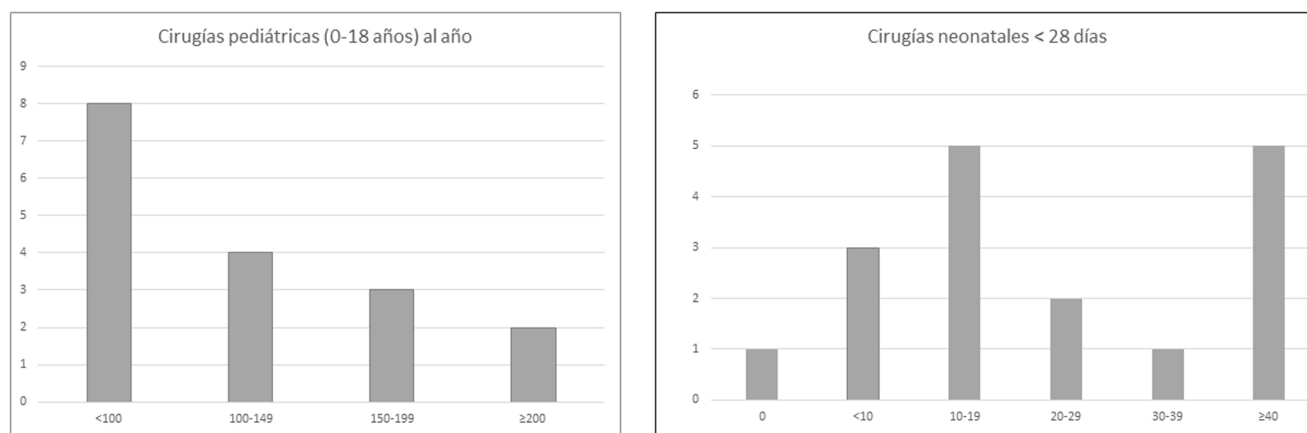


Figura 2 Número de cirugías cardíacas: En esta figura se describen el número de cirugías por centro, en función del volumen realizado por cada centro, separándose entre el total de cirugías pediátricas (a) y las neonatales (b).

Tabla 1 La utilización de la neuroimagen como herramienta para evaluar el sistema nervioso central, antes y después de la cirugía

		Antes de la cirugía	Después de la cirugía
Realiza neuroimagen	Sí	14 (87%)	13 (81%)
	No	2 (12%)	3 (18%)
	Todos los pacientes	4 (25%)	8 (50%)
	Sólo neonatos	10 (63%)	5 (31%)
	Sólo pediátricos	0 (0%)	0 (0%)
Tipo de neuroimagen	Ecografía transfontanelar (ET)	16 (100%)	13 (81%)
	Resonancia magnética (RM) cerebral	2 (13%)	9 (56%)
	Tomografía computarizada (TC)	1 (6%)	4 (25%)
	Ninguno	0 (0%)	3 (18%)

práctica clínica entre centros, especialmente en relación con el uso de técnicas de neuromonitorización, la realización de estudios de neuroimagen y el seguimiento neuroconductor de los pacientes.

Existe una evidencia creciente de que los pacientes con CC presentan alteraciones del sistema nervioso central y LSB ya antes de la cirugía¹⁵⁻¹⁷. Por este motivo, se recomienda la realización de pruebas de imagen preoperatorias, siendo la RM la técnica de elección¹⁷.

En nuestra encuesta, todos los centros indicaron que utilizan la ET, especialmente en RN, mientras que la RM se reserva para pacientes sintomáticos o en protocolos de investigación. Aunque la ET es la herramienta más empleada, existe poca evidencia sobre su valor predictivo en los pacientes con CC. Un estudio de Latal et al. demostró que, si bien la ET puede proporcionar información relevante precirugía, su capacidad para predecir el neurodesarrollo a los 12 meses en estos pacientes es limitada¹⁸.

Las lesiones cerebrales perioperatorias son comunes en pacientes con CC¹⁹. Aunque las lesiones postoperatorias no son las más frecuentes, diversos estudios subrayan su impacto en el neurodesarrollo²⁰. Las LSB se han asociado a resultados motores desfavorables, una reducción del cociente intelectual y una mayor prevalencia de problemas de atención en edad escolar²¹.

Entre los centros encuestados, la ET es la técnica más utilizada para la evaluación postoperatoria en RN. Aunque la

RM es el estándar de oro en neuroimagen, presenta limitaciones, como la necesidad de trasladar al paciente, su alto coste y la dificultad de realizar estudios seriados. Además, la RM requiere inmovilidad, lo que en algunos centros implica el uso de sedación, con los riesgos asociados²². Según la encuesta, el 67% de los centros realizan las RM bajo anestesia. Algunos centros optan por el uso del sueño natural, una estrategia validada, especialmente en RN²³.

La ENE es una herramienta fundamental para detectar alteraciones neurológicas²⁴. La evaluación de los movimientos generales durante los primeros meses de vida se ha correlacionado con el coeficiente intelectual en la edad escolar y puede predecir el desarrollo psicomotor hasta los 9-12 años^{25,26}. En RN con CC, escalas como la *Neonatal Intensive Care Unit Network Neurobehavioral Scale*^{27,28}, el *Einstein Neonatal Neurobehavioral Assessment Scale*^{29,30} y la evaluación de los Movimientos Generales³¹ han demostrado su utilidad para identificar pacientes en riesgo durante el periodo postoperatorio³².

En España, el 63% de los centros realizan alguna forma de ENE en los RN antes y después de la cirugía. Sin embargo, en el 31% de los centros, esta solo se realiza en caso de preocupación clínica, una proporción considerablemente superior al 20% reportado en los centros europeos¹⁴. Realizar una ENE antes del alta hospitalaria es una estrategia simple y eficaz que debería incorporarse de forma rutinaria en la práctica clínica de esta población.

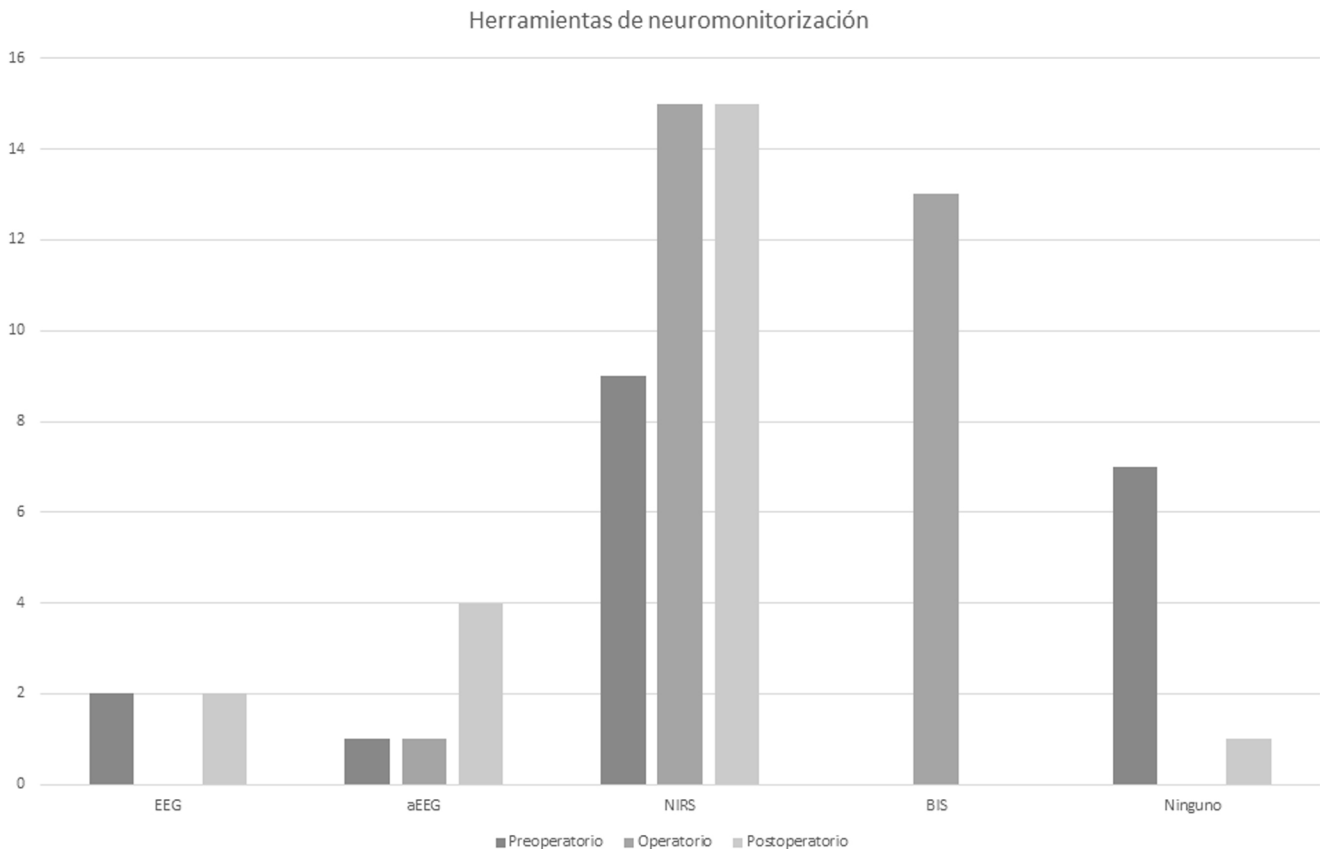


Figura 3 Herramientas de neuromonitorización utilizadas durante el periodo pre- y postoperatorio y durante la cirugía. EEG: electroencefalograma convencional; aEEG: electroencefalograma integrado por amplitud; NIRS: espectroscopia de infrarrojo cercano; BIS: índice biespectral.

La neuromonitorización durante la CCP y el perioperatorio es esencial para el manejo de pacientes con CC, permitiendo anticipar complicaciones³³. Cuando preguntamos sobre las estrategias de neuromonitorización utilizadas, la SrcO₂ medida mediante NIRS es el método más utilizado: el 56% en el preoperatorio, 94% intracirugía y 94% en el postoperatorio. Aunque existen datos contradictorios sobre su capacidad predictiva para la lesión cerebral y el neurodesarrollo, sigue siendo una de las estrategias más utilizadas en quirófano y en las UCI.

Otra estrategia de neuromonitorización con valor predictivo en pacientes con CC es el aEEG, especialmente en RN³⁴. Patrones alterados de aEEG en el perioperatorio se han asociado con lesiones cerebrales detectadas en la RM preoperatoria³⁵. En el postoperatorio, la identificación de actividad cerebral anormal se considera un buen indicador de lesión cerebral⁴. Además, el retraso en la recuperación del patrón de base o en los ciclos sueño-vigilia posquirúrgicos tiene un alto valor predictivo para la mortalidad y las alteraciones en el neurodesarrollo³⁶.

Aunque el aEEG puede identificar precozmente a los RN con mayor riesgo, en España solo el 25% de los centros lo utilizan, y rara vez en pacientes pediátricos. Datos similares se observan en el estudio europeo citado, donde únicamente el 20-30% de los centros usan el aEEG en el postoperatorio.

Existen evidencias de que los niños con CC presentan más alteraciones del neurodesarrollo y problemas de aprendizaje, especialmente aquellos que requieren CCP o paliación

temprana^{12,20}. Aunque algunos países cuentan con guías para el seguimiento de pacientes con riesgo neurológico, como los prematuros extremos, hasta hace poco no existían guías específicas para pacientes con CC. En 2012, la Asociación Americana del Corazón y la Academia Americana de Pediatría publicaron una Declaración Científica que establece prácticas recomendadas para la valoración y seguimiento en pacientes con CC¹³. Esta guía, actualizada en 2024, incluye una nueva estratificación de los grupos de riesgo³⁷.

Tras esta publicación, la *Cardiac Neurodevelopmental Outcome Collaborative* elaboró guías de práctica clínica para el seguimiento neurológico y neuroconductual de estos pacientes tras el alta hospitalaria³⁸. En España, el 31% de los centros españoles implementan o están planificando un protocolo para el seguimiento neurológico, en contraste con un 40% observado en Europa¹⁴.

A pesar de que los resultados obtenidos son bastante similares a los reportados en otros países europeos, las particularidades de nuestro sistema de salud pueden influir en las diferencias observadas entre las distintas comunidades autónomas. A partir de estos hallazgos, la elaboración de una guía de consenso nacional podría contribuir a proporcionar equidad en el manejo global de estos pacientes.

Conclusión

Los resultados de esta encuesta evidencian una notable heterogeneidad en las prácticas de neuromonitorización,

neuroimagen y seguimiento del neurodesarrollo para pacientes con CC en los centros españoles con programas de CCP. Esta información permite iniciar un proceso para identificar de manera detallada los problemas, tanto locales como generales, y los recursos necesarios, tanto técnicos como humanos, así como realizar un análisis económico y clínico de la situación en nuestro país.

La formación de un grupo de consenso podría ser un punto de partida para la elaboración de una guía conjunta, adaptada a las necesidades y peculiaridades de todos los centros españoles que ofrecen CCP.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Anexo 1. Grupo de Neuromonitorización del paciente con cardiopatía congénita

Alexandra Belfi: Vanderbilt University School of Medicine, Vanderbilt University. Nashville, USA.

Laia Vega: Unidad de cuidados intensivos pediátricos y neonatales. Hospital Universitari Dexeus, Grupo Quiron Salud. Barcelona, España.

Marta Aguar; Unidad de Neonatología Hospital Universitario y Politécnico La Fe. Valencia, España.

María Carmen Bravo; Unidad de Neonatología Hospital La Paz. Madrid, España.

Déborra Cañizo; Servicio Neonatología, BCNatal - Barcelona Center for Maternal Fetal and Neonatal Medicine, Hospital Sant Joan de Déu - Hospital Clínic, Universidad de Barcelona, Barcelona, España. ICare4Kits, grupo de investigación cardiovascular, Institut de recerca Sant Joan de Déu, Barcelona, España.

Laura Díaz Rueda; Cuidados intensivos pediátricos. Hospital Virgen de las Nieves, Granada, España.

Cristina Fernández-García; Servicio de Neonatología. Hospital Universitari Vall d'Hebron. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona, España.

Ángela Ferrer; Complejo Hospitalario Universitario A Coruña. A Coruña, España.

José Manuel González Gómez; Hospital Materno Infantil de Málaga. Málaga, España.

Laura Ximena Herrera Castillo; Hospital General Universitario Gregorio Marañón. Madrid, España.

Jaume Izquierdo-Blasco; Servicio de Cuidados intensivos Pediátricos. Hospital Universitari Vall d'Hebron. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona, España.

Begoña Loureiro; Servicio Neonatología, Hospital Universitario Cruces. Barakaldo, España.

María Miñambres Rodríguez; Hospital Clínico Universitario Virgen de la Arrixaca. Murcia, España.

Raúl Montero Yéboles; Unidad de Cuidados intensivos Pediátricos. Hospital Reina Sofía, Córdoba. España.

M^{re} Ángeles Murillo Pozo; Unidad de Cuidados Intensivos Pediátricos. Hospital Universitario Virgen del Rocío. Sevilla, España.

Esther Ocete Hita; Cuidados intensivos pediátricos. Hospital Virgen de las Nieves, Granada, España.

Marta Olmedilla Jódar; Unidad de Cuidados intensivos Pediátricos. Hospital 12 Octubre. Madrid, España.

Daniel Palanca Arias; Unidad de Cuidados Intensivos Pediátricos. Unidad de Cardiología Pediátrica. Hospital Universitario Miguel Servet, Zaragoza, España.

Rosa Pérez-Piaya Moreno; HM Montepíncipe, de su Unidad de cuidados Intensivos Pediátricos y Neonatales. Madrid, España.

Úrsula Quesada; Unidad de Cuidados Intensivos Pediátricos. Hospital Universitario Virgen del Rocío. Sevilla, España.

M Victoria Ramos Casado; Unidad de Cuidados intensivos Pediátricos. Hospital 12 Octubre. Madrid, España.

Silvia Redondo Blázquez; Servicio Cuidados intensivos Pediátricos, Hospital Universitario Cruces. Barakaldo, España.

Alba Ribas; Servicio Neonatología, BCNatal - Barcelona Center for Maternal Fetal and Neonatal Medicine, Hospital Sant Joan de Déu - Hospital Clínic, Universidad de Barcelona, Barcelona, España. ICare4Kits, grupo de investigación cardiovascular, Institut de recerca Sant Joan de Déu, Barcelona, España.

Cristina Ruiz-Herguido; Servicio Neonatología, BCNatal - Barcelona Center for Maternal Fetal and Neonatal Medicine, Hospital Sant Joan de Déu - Hospital Clínic, Universidad de Barcelona, Barcelona, España. ICare4Kits, grupo de investigación cardiovascular, Institut de recerca Sant Joan de Déu, Barcelona, España.

Francisco de Asís Sánchez Martínez; Hospital Clínico Universitario Virgen de la Arrixaca. Murcia, España.

Amelia Caridad Sánchez Galindo; Hospital General Universitario Gregorio Marañón. Madrid, España.

Joan Sanchez-de-Toledo; Servicio de cardiología pediátrica, Hospital Sant Joan de Déu, Barcelona, España. ICare4Kits, grupo de investigación cardiovascular, Institut de recerca Sant Joan de Déu, Barcelona, España. Department of Critical Care Medicine, University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.

Eva Valverde; Unidad de Neonatología Hospital La Paz. Madrid, España.

Jose Luis Vazquez; Hospital Ramon y Cajal. Madrid, España.

Cristina Yun Castilla; Hospital Materno Infantil de Málaga. Málaga, España.

Marta Camprubí-Camprubí; Servicio Neonatología, BCNatal - Barcelona Center for Maternal Fetal and Neonatal Medicine, Hospital Sant Joan de Déu - Hospital Clínic, Universidad de Barcelona, Barcelona, España. ICare4Kits, grupo de investigación cardiovascular, Institut de recerca Sant Joan de Déu, Barcelona, España.

Bibliografía

- Oster ME, Lee KA, Honein MA, Riehle-Colarusso T, Shin M, Correa A. Temporal trends in survival among infants with critical congenital heart defects. *Pediatrics*. 2013;131:e1502-8, <http://dx.doi.org/10.1542/peds.2012-3435>.
- Sarrechia I, Miatton M, De Wolf D, François K, Gewillig M, Meyns B, Vingerhoets G. Neurocognitive development and behaviour in school-aged children after surgery for univentricular or biventricular congenital heart disease. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2016;49:167-74, <http://dx.doi.org/10.1093/ejcts/ezv029>.
- Aly SA, Zurakowski D, Glass P, Skurow-Todd K, Jonas RA, Donofrio MT. Cerebral tissue oxygenation index and lactate at 24hours postoperative predict survival and neurodevelopment.

- tal outcome after neonatal cardiac surgery. *Congenit Heart Dis.* 2017;12:188–95.
4. Claessens NHP, Noorlag L, Weeke LC, Toet MC, Breur JMPJ, Algra SO, et al. Amplitude-Integrated Electroencephalography for Early Recognition of Brain Injury in Neonates with Critical Congenital Heart Disease. *J Pediatr.* 2018;202:199–205, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpeds.2018.06.048>, e1.
 5. Schlosser L, Kessler N, Feldmann M, Wehrle F, Rometsch S, Greutmann M, et al. Neurocognitive functioning in young adults with congenital heart disease: insights from a case-control study. *Cardiol Young.* 2022;32:694–701, <http://dx.doi.org/10.1017/S1047951121002705>. Epub ahead of print. PMID: 34294187.
 6. Peyvandi S, Rollins C. Fetal Brain Development in Congenital Heart Disease. *Can J Cardiol.* 2023;39:115–22, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cjca.2022.09.020>.
 7. Khalil A, Suff N, Thilaganathan B, Hurrell A, Cooper D, Carvalho JS. Brain abnormalities and neurodevelopmental delay in congenital heart disease: systematic review and meta-analysis. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2014;43:14–24.
 8. Peyvandi S, Kim H, Lau J, Barkovich AJ, Campbell A, Miller S, et al. The association between cardiac physiology, acquired brain injury, and postnatal brain growth in critical congenital heart disease. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2018;155:291–300, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtcvs.2017.08.019>, e3.
 9. Bell JL, Saenz L, Domnina Y, Baust T, Panigrahy A, Bell MJ, et al. Acute Neurologic Injury in Children Admitted to the Cardiac Intensive Care Unit. *Ann Thorac Surg.* 2019;107:1831–7, <http://dx.doi.org/10.1016/j.athoracsur.2018.12.027>. Epub 2019 Jan 22. PMID: 30682351.
 10. Miller SP, McQuillen PS, Hamrick S, Xu D, Glidden D, Charlton N, et al. Abnormal Brain Development in Newborns with Congenital Heart Disease. *N Engl J Med.* 2007;8:1928–38.
 11. Blue GM, Ip E, Walker K, Kirk EP, Loughran-Fowlds A, Sholler GF, et al. Genetic burden and associations with adverse neurodevelopment in neonates with congenital heart disease. *Am Heart J.* 2018;201:33–9.
 12. Morton PD, Ishibashi N, Jonas RA. Neurodevelopmental Abnormalities and Congenital Heart Disease: Insights Into Altered Brain Maturation. *Circ Res.* 2017;120:960–77, <http://dx.doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.116.309048>.
 13. Marino BS, Lipkin PH, Newburger JW, Peacock G, Gerdes M, Gaynor JW, et al. Neurodevelopmental outcomes in children with congenital heart disease: evaluation and management: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation.* 2012;126:1143–72, <http://dx.doi.org/10.1161/CIR.0b013e318265ee8a>.
 14. Feldmann M, Hagmann C, de Vries L, Disselhoff V, Pushparajah K, Logeswaran T, et al. Neuromonitoring, neuroimaging, and neurodevelopmental follow-up practices in neonatal congenital heart disease: a European survey. *Pediatr Res.* 2023;93:168–75, <http://dx.doi.org/10.1038/s41390-022-02063-2>.
 15. Kelly CJ, Arulkumaran S, Tristão Pereira C, Cordero-Grande L, Hughes EJ, Teixeira RPAG, et al. Neuroimaging findings in newborns with congenital heart disease prior to surgery: an observational study. *Arch Dis Child.* 2019;104:1042–8, <http://dx.doi.org/10.1136/archdischild-2018-314822>. Epub 2019 Jun 26. PMID: 31243012; PMCID: PMC6801127.
 16. Peyvandi S, Latal B, Miller SP, McQuillen PS. The neonatal brain in critical congenital heart disease: Insights and future directions. *Neuroimage.* 2019;185:776–82, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.05.045>. Epub 2018 May 19. PMID: 29787864.
 17. Alablani FJ, Chan HSA, Beishon L, Patel N, Almudayni A, Bu'Lock F, et al. Paediatric brain MRI findings following congenital heart surgery: a systematic review. *Arch Dis Child.* 2022;107:818–25, <http://dx.doi.org/10.1136/archdischild-2021-323132>. Epub 2022 Mar 22. PMID: 35318194; PMCID: PMC9411899.
 18. Latal B, Kellenberger C, Dimitropoulos A, Hagmann C, Balmer C, Beck I, et al. Can preoperative cranial ultrasound predict early neurodevelopmental outcome in infants with congenital heart disease? *Dev Med Child Neurol.* 2015;57:639–44, <http://dx.doi.org/10.1111/dmcn.12701>.
 19. Stegeman R, Feldmann M, Claessens NHP, Jansen NJG, Breur JMPJ, de Vries L.S., et al., A Uniform Description of Perioperative Brain MRI Findings in Infants with Severe Congenital Heart Disease: Results of a European Collaboration. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2021;42:2034–9, <http://dx.doi.org/10.3174/ajnr.A7328>.
 20. Vega Puyal L, Llubra E, Ferrer Q, Dolader Codina P, Sánchez García O, Montoliu Ruiz A, et al. Neurodevelopmental outcomes in congenital heart disease: Usefulness of biomarkers of brain injury. *An Pediatr (Engl Ed).* 2024;100:13–24, <http://dx.doi.org/10.1016/j.anpede.2023.12.007>. Epub 2024 Jan 6. PMID: 38185573.
 21. Claessens NHP, Algra SO, Ouwehand TL, Jansen NJG, Schappin R, Haas F, et al. Perioperative neonatal brain injury is associated with worse school-age neurodevelopment in children with critical congenital heart disease. *Dev Med Child Neurol.* 2018;60:1052–8, <http://dx.doi.org/10.1111/dmcn.13747>.
 22. Artunduaga M, Liu CA, Morin CE, Serai SD, Udayasankar U, Greer MC, et al. Safety challenges related to the use of sedation and general anesthesia in pediatric patients undergoing magnetic resonance imaging examinations. *Pediatr Radiol.* 2021;51:724–35, <http://dx.doi.org/10.1007/s00247-021-05044-5>.
 23. Mathur AM, Neil JJ, McKinstry RC, Inder TE. Transport, monitoring, and successful brain MR imaging in unsedated neonates. *Pediatr Radiol.* 2008;38:260–4, <http://dx.doi.org/10.1007/s00247-007-0705-9>.
 24. Owen M, Shevell M, Donofrio M, Majnemer A, McCarter R, Vezina G, et al. Brain volume and neurobehavior in newborns with complex congenital heart defects. *J Pediatr.* 2014;164:1121–7, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpeds.2013.11.033>, e1.
 25. Bruggink JL, Van Braeckel KN, Bos AF. The early motor repertoire of children born preterm is associated with intelligence at school age. *Pediatrics.* 2010;125:e1356–63, <http://dx.doi.org/10.1542/peds.2009-2117>.
 26. Groen SE, de Blécourt AC, Postema K, Hadders-Algra M. General movements in early infancy predict neuromotor development at 9 to 12 years of age. *Dev Med Child Neurol.* 2005;47:731–8, <http://dx.doi.org/10.1017/S0012162205001544>.
 27. Massaro AN, Glass P, Brown J, Chang T, Krishnan A, Jonas RA, et al. Neurobehavioral abnormalities in newborns with congenital heart disease requiring open-heart surgery. *J Pediatr.* 2011;158:678–81, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpeds.2010.11.060>, e2.
 28. Hogan WJ, Winter S, Pinto NM, Weng C, Sheng X, Conrad E, et al. Neurobehavioral evaluation of neonates with congenital heart disease: a cohort study. *Dev Med Child Neurol.* 2018;60:1225–31, <http://dx.doi.org/10.1111/dmcn.13912>.
 29. Limperopoulos C, Majnemer A, Shevell MI, Rosenblatt B, Rohlicek C, Tchervenkov C. Neurodevelopmental status of newborns and infants with congenital heart defects before and after open heart surgery. *J Pediatr.* 2000;137:638–45, <http://dx.doi.org/10.1067/mpd.2000.109152>.
 30. Cañizo-Vazquez D, Hadley S, Leonhardt M, Camprubi-Camprubi M, Sanchez-de-Toledo J. Early post-operative neurodevelopment and visual assessment in neonates with congenital heart disease undergoing cardiac surgery. *J Perinatol.* 2023;43:856–63, <http://dx.doi.org/10.1038/s41372-022-01555-7>. Epub 2022 Nov 8. PMID: 36347968.

31. Huisenga DC, Van Bergen AH, Sweeney JK, Wu YC, Hadders-Algra M. The quality of general movements in infants with complex congenital heart disease undergoing surgery in the neonatal period. *Early Hum. Dev.* 2020;151:105167, <http://dx.doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2020.105167>.
32. Novak I, Morgan C, Adde L, Blackman J, Boyd RN, Brunstrom-Hernandez J, et al. Early, Accurate Diagnosis and Early Intervention in Cerebral Palsy: Advances in Diagnosis and Treatment [published correction appears in *JAMA Pediatr.* 2017 Sep 1;171(9):919]. *JAMA Pediatr.* 2017;171:897–907, <http://dx.doi.org/10.1001/jamapediatrics.2017.1689>.
33. Lewis C, Parulkar SD, Bebawy J, Sherwani S, Hogue CW. Cerebral Neuromonitoring During Cardiac Surgery: A Critical Appraisal With an Emphasis on Near-Infrared Spectroscopy. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2018;32:2313–22, <http://dx.doi.org/10.1053/j.jvca.2018.03.032>.
34. Shellhaas RA, Chang T, Tsuchida T, Scher MS, Riviello JJ, Abend NS, et al. The American Clinical Neurophysiology Society's Guideline on Continuous Electroencephalography Monitoring in Neonates. *J Clin Neurophysiol.* 2011;28:611–7, <http://dx.doi.org/10.1097/WNP.0b013e31823e96d7>.
35. Mulkey SB, Yap VL, Bai S, Ramakrishnaiah RH, Glasier CM, Bornemeier RA, et al. Amplitude-integrated EEG in newborns with critical congenital heart disease predicts preoperative brain magnetic resonance imaging findings. *Pediatr Neurol.* 2015;52:599–605, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2015.02.026>.
36. Latal B, Wohlrab G, Brotschi B, Beck I, Knirsch W, Bernet V. Postoperative Amplitude-Integrated Electroencephalography Predicts Four-Year Neurodevelopmental Outcome in Children with Complex Congenital Heart Disease. *J Pediatr.* 2016;178:55–60, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpeds.2016.06.050>, e1.
37. Sood E, Newburger JW, Anixt JS, Cassidy AR, Jackson JL, Jonas RA, et al. American Heart Association Council on Lifelong Congenital Heart Disease and Heart Health in the Young and the Council on Cardiovascular and Stroke Nursing. Neurodevelopmental Outcomes for Individuals With Congenital Heart Disease: Updates in Neuroprotection, Risk-Stratification, Evaluation, and Management: A Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation.* 2024;149:e997–1022, <http://dx.doi.org/10.1161/CIR.0000000000001211>. Epub 2024 Feb 22. PMID: 38385268.
38. Ware J, Butcher JL, Latal B, Sadhwani A, Rollins CK, Brosig Soto CL, et al. Neurodevelopmental evaluation strategies for children with congenital heart disease aged birth through 5 years: recommendations from the cardiac neurodevelopmental outcome collaborative. *Cardiol Young.* 2020;30:1609–22, <http://dx.doi.org/10.1017/S1047951120003534>.