

ORIGINAL

Saturación cerebral de oxígeno como marcador hemodinámico en la cirugía cardíaca

J.A. García-Hernández^{a,*}, A. Aldemira-Liz^a, A.I. Martínez-López^b, A. Cayuela^c, M.T. Charlo-Molina^a, J. Cano-Franco^a y M. Loscertales-Abril^a

^a Unidad de Gestión Clínica de Cuidados Críticos y Urgencias, Hospital Infantil Universitario Virgen del Rocío, Sevilla, España

^b Equipo Básico de Atención Primaria, Centro de Salud de Alcosa, Sevilla, España

^c Unidad de Apoyo a la Investigación, Unidad de Gestión Clínica de Salud Pública, Distrito Sanitario Sevilla Sur-Hospital de Valme, Sevilla, España

Recibido el 7 de diciembre de 2012; aceptado el 13 de febrero de 2013

Disponible en Internet el 26 de marzo de 2013

PALABRAS CLAVE

Saturación de oxígeno venosa central;
Cirugía cardíaca;
Espectroscopia cercana al infrarrojo;
Oximetría cerebral;
Cuidados perioperatorios

Resumen

Introducción: La saturación cerebral de oxígeno (SrcO₂) es una medida del estado de perfusión y oxigenación. El objetivo ha sido analizar la relación entre la SrcO₂ y varios parámetros hemodinámicos y respiratorios.

Pacientes y métodos: Entre octubre del 2011 y julio del 2012, se intervino a 43 niños que fueron incluidos en un estudio prospectivo, observacional y descriptivo. Se midieron la SrcO₂ y la presión arterial media (PAM), y se realizaron gasometrías en sangre arterial y venosa. Se determinaron la saturación arterial (SaO₂), la saturación venosa (SvcO₂), la presión arterial de oxígeno (paO₂) y anhídrido carbónico (paCO₂), y el lactato, y se calcularon la paO₂/FiO₂, el índice de oxigenación (IO) y la extracción tisular de oxígeno (ETO₂). Estas medidas fueron correlacionadas con la SrcO₂, determinándose además la concordancia (índice Kappa) entre esta variable y las que resultaron significativas en el análisis de correlación.

Resultados: La edad y el peso fueron de 27,3 meses y 9,2 kg. Se encontraron una correlación positiva de la SrcO₂ con la SvcO₂ (r=0,73, p<0,01) y con la PAM (r=0,59, p<0,01), y una correlación negativa con la ETO₂ (r=-0,7, p<0,01). La SrcO₂ no se correlacionó con las variables respiratorias. El análisis de concordancia estableció un índice Kappa aceptable (> 0,4) entre la SrcO₂ y la SvcO₂, y entre la SrcO₂ y la ETO₂.

Conclusiones: La SrcO₂ se relaciona estadísticamente con variables hemodinámicas como la PAM, la SvcO₂ y la ETO₂, pero no con variables respiratorias.

© 2012 Asociación Española de Pediatría. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: garcier@gmail.com (J.A. García-Hernández).

KEYWORDS

Central venous oxygen saturation;
Cardiac surgery;
Near-infrared spectroscopy;
Cerebral oximetry;
Perioperative care

Regional cerebral oxygen saturation as a marker of hemodynamic state following cardiac surgery**Abstract**

Introduction: Regional cerebral oxygen saturation (rSO₂) is a measure of the general state of perfusion and oxygenation. We aim to analyze the relationship between this and various hemodynamic and respiratory parameters.

Patients and methods: Forty-three patients, operated on between October 2011 and July 2012, were included in this prospective observational descriptive study. The following parameters were measured: mean arterial pressure, both arterial and central venous oxygen saturation and partial pressures of oxygen and carbon dioxide, and lactate levels. From these parameters, the oxygenation index and the oxygen extraction ratio were calculated. These measurements were studied to evaluate whether rSO₂ correlated significantly with the other parameters.

Results: The average age and weight of the patients were 27.3 months and 9.2 kg, respectively. The rSO₂ correlated positively with both central venous oxygen saturation ($r = 0.73$, $P < .01$) and mean arterial pressure ($r = 0.59$, $P < .01$), and negatively with the oxygen extraction ratio ($r = -0.7$, $P < .01$). No correlation was found with the respiratory parameters. Concordance analysis established an acceptable Kappa index (> 0.4) between the rSO₂ and central venous oxygen saturation, and between the rSO₂ and oxygen extraction ratio.

Conclusions: Regional cerebral oxygen saturation correlates well with hemodynamic parameters - mean arterial pressure, venous saturation, and the tissue oxygen extraction. However, it does not correlate with respiratory parameters.

© 2012 Asociación Española de Pediatría. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Introducción

La saturación regional cerebral de oxígeno (SrcO₂) representa la cantidad de oxígeno que el tejido cerebral posee y que se encuentra contenido en las arteriolas, capilares y vénulas. Su medición en tiempo real, a través de un sensor colocado en la región frontal, nos informa de forma continua y no invasiva del adecuado balance entre el aporte y el consumo de oxígeno en el cerebro¹.

La SrcO₂ se ha correlacionado de forma directa con algunos parámetros hemodinámicos, como la saturación venosa central de oxígeno (ScvO₂)². Otros autores, en cambio, no la han encontrado³.

El objetivo de este trabajo ha sido analizar la relación existente entre la SrcO₂ y una serie de parámetros hemodinámicos y respiratorios, que son determinados habitualmente en el postoperatorio de las cardiopatías congénitas.

Pacientes y métodos

En un hospital infantil de tercer nivel, y en un periodo comprendido entre octubre del 2011 y julio del 2012, se intervinieron consecutivamente a 43 niños con diversos tipos de cardiopatías congénitas. Se realizó un estudio prospectivo, observacional y descriptivo, aprobado por el comité de ética e investigación sanitaria del hospital, y en el que se obtuvo previamente consentimiento informado de los padres.

Se agruparon las cardiopatías según el método internacional de estratificación de riesgo de la cirugía RACHS-1^{4,5} en 6 categorías, siendo el nivel 1 el de menor complejidad y el nivel 6 el de máxima.

Los criterios de inclusión fueron: a) edad < 14 años; b) peso < 40 kg y > 2,5 kg, y c) intervención con circulación extracorpórea. Los criterios de exclusión fueron: a) denegación consentimiento informado, y b) contraindicación para canular la vena yugular interna derecha. Para optimizar la interpretación de los datos, se clasificó a los pacientes en 3 grupos en función de la edad: de 0 a 1 mes, mayores de 1 mes hasta 1 año, y mayores de 1 año hasta 14 años.

El estudio se realizó en la UCI pediátrica y se basó en la medición continua de la SrcO₂, y en la realización de gasometrías en sangre arterial, procedente de la arteria radial o cubital, y de sangre venosa, extraída de un catéter situado en vena yugular interna.

La técnica para recoger la señal de la SrcO₂ se fundamenta en la emisión de un haz lumínico por espectrometría cercana al infrarrojo Near-infrared spectroscopy (NIRS), a través de un solo sensor adherido a la piel de la región frontal media de la cabeza, que se conecta a un monitor NIRS (Invos Cerebral Oximeter, Somanetics, Troy, EE. UU.) y nos permite determinar el valor numérico. La SrcO₂ ha presentado los mismos valores en ambos hemisferios en un estudio realizado en niños sometidos a cirugía cardíaca, por lo que su medición unilateral, o en la región media frontal, sería suficiente, reduciéndose así el gasto económico al utilizar un solo sensor⁶.

En las muestras de sangre se midieron la saturación arterial de oxígeno (SaO₂), la ScvO₂, la presión parcial arterial de oxígeno (paO₂), la presión parcial arterial de anhídrido carbónico (paCO₂) y el lactato venoso. Con estos parámetros, se calcularon el cociente paO₂/fracción inspiratoria de oxígeno (FiO₂), el índice de oxigenación (IO) y la extracción tisular de oxígeno (ETO₂). El valor recogido de la SrcO₂ y de la presión arterial media (PAM) fue el que presentaba el paciente en el monitor en el momento de las distintas extracciones.

Se hicieron varias determinaciones en forma secuencial. La primera, tras la intervención quirúrgica al ingreso del paciente en UCI y las siguientes, a las 4 y 8 h, y por último, a las 8 h del día siguiente. Se consideraron variables respiratorias: la SaO₂, la paO₂, la paCO₂, la paO₂/FiO₂, y el IO, y variables hemodinámicas: la SvcO₂, la PAM, la ETO₂ y el lactato venoso.

La SvcO₂ muestra el valor de oxígeno residual que llega al corazón tras la extracción por los tejidos; su valor normal es del 70%. Está determinada por el equilibrio entre el aporte y el consumo de oxígeno tisular, siendo su disminución una manifestación de un aumento en la extracción de oxígeno por los tejidos, determinado probablemente por un descenso del gasto cardíaco.

El IO relaciona la PaO₂ con la presión media en la vía aérea (Paw) y la FiO₂, y se calcula según la fórmula: $IO = FiO_2 \times Paw / PaO_2$, siendo su valor normal ≤ 5 . Valora la oxigenación en relación con el grado de asistencia respiratoria.

La ETO₂ calcula el porcentaje de oxígeno extraído por los tejidos; este parámetro junto con la SvcO₂ y el lactato son los que mejor estiman el gasto cardíaco. Se calculó obteniendo la diferencia entre la SaO₂ y la SvO₂ y, posteriormente, dividiendo el resultado entre la SaO₂ ($ETO_2 = [SaO_2 - SvO_2] \div SaO_2$)⁷. Los valores normales oscilan entre 0,24 y 0,28, considerando algunos autores que una cifra mayor de 0,5 posee una alta capacidad predictiva de muerte⁸.

Análisis estadístico

En primer lugar, se realizó un análisis descriptivo de las variables cualitativas usando frecuencias absolutas y relativas. Se utilizaron además la mediana y el rango intercuartílico en las variables cuantitativas, dado que no seguían una distribución normal.

Para valorar la asociación entre variables cuantitativas se usó el coeficiente de rango de Spearman. Se consideró que un coeficiente de correlación (r) presenta una débil asociación estadística si está comprendido entre 0 y 0,30; moderada si está entre 0,30 y 0,60; fuerte si oscila entre 0,60 y 0,80, y muy fuerte si es igual o mayor de 0,8.

La concordancia entre variables dicotómicas se analizó mediante el índice Kappa. Se consideró un índice Kappa aceptable cuando su valor es superior a 0,4. Para valorar las características diagnósticas de las variables frente a la variable SrcO₂ dicotomizada, se calculó el área bajo la curva y sus correspondientes intervalos de confianza.

Resultados

Los valores medios de edad, peso, tiempos quirúrgicos, tiempo de ventilación mecánica, tiempo de estancia en UCI-P y categoría de riesgo quirúrgico (RACHS-1) se expresan en la [tabla 1](#). Las intervenciones quirúrgicas a las que fueron sometidos los pacientes según su afección de base se resumen en la [tabla 2](#). Las frecuencias y la mortalidad de cada una de las categorías de riesgo quirúrgico se exponen en la [tabla 3](#).

Los neonatos presentaron el mayor nivel de complejidad quirúrgica, correspondiéndose con una puntuación media \pm desviación estándar en la escala RACHS-1 de $3,7 \pm 1,2$; le

Tabla 1 Estadística descriptiva de la población estudiada

	P ₅₀	P ₂₅₋₇₅
Edad (meses)	6,00	0,86-35,50
Peso (kg)	5,80	3,65-10,65
CEC (min)	120	82-157
P aórtico (min)	68	27-101
VMC (h)	45	8,75-115
Estancia UCI-P (días)	5	4-10
RACHS-1	3	2-3

CEC: circulación extracorpórea; P aórtico: pinzamiento aórtico; VMC: ventilación mecánica convencional.

Tabla 2 Tipo de intervención quirúrgica

Intervención quirúrgica	Frecuencia
Switch arterial	7
Corrección Fallot	7
Corrección canal AV	6
Cierre CIV	3
Switch arterial + cierre CIV	2
Cierre CIA	2
Nikaidoh	2
Recambio Contegra	2
Resección subaórtica	2
YASUI	1
Prótesis valvular aórtica	1
Prótesis valvular pulmonar	1
Norwood	1
Fontan	1
Corrección truncus	1
Jatene + coartectomía	1
Cierre DAP + cierre CIA	1
Ampliación TSVD	1
Ampliación TSVD + cierre CIA + cierre CIV	1

Canal AV: canal auriculoventricular; CIA: comunicación interauricular; CIV: comunicación interventricular; DAP: ductus arterioso permeable; TSVD: tracto de salida del ventrículo derecho.

siguieron en orden decreciente, y con una puntuación parecida, los niños ($2,7 \pm 1$) y después los lactantes ($2,6 \pm 0,8$). Se han encontrado diferencias estadísticamente significativas en la SrcO₂ entre los distintos grupos de edad y en las distintas determinaciones realizadas, siendo más bajas en neonatos y más altas en niños ([fig. 1](#)).

Tabla 3 Distribución por categorías según método RACHS-1

RACHS-1	Frecuencia	Mortalidad esperada	Mortalidad obtenida
R1	3 (7%)	0,4%	0%
R2	10 (23,2%)	3,8%	0%
R3	21 (48,8%)	9,5%	19% (4/21)
R4	7 (16,3%)	19,5%	14,3% (1/7)
R5	0 (0%)	-	-
R6	2 (4,6%)	47%	100% (2/2)

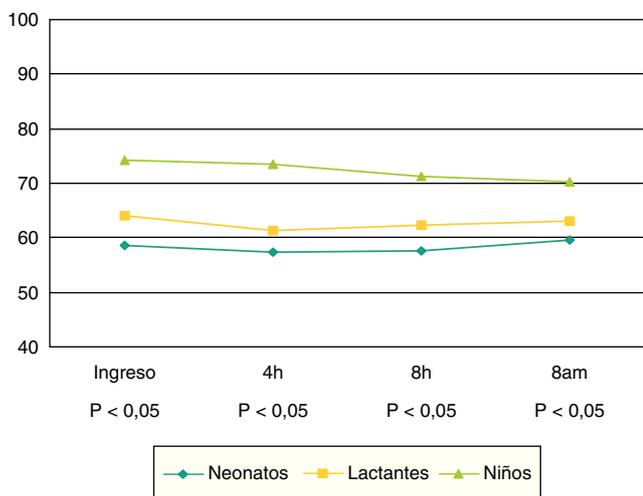


Figura 1 SrcO₂: saturación regional cerebral de oxígeno según grupos de edad.

La SrcO₂ no se correlacionó con las variables respiratorias estudiadas, salvo una moderada correlación positiva al ingreso entre la SrcO₂ y la PaO₂/FiO₂ (r=0,4, p<0,01). No se observó ningún tipo de correlación con la PaO₂ ni con el IO.

Con respecto a las variables hemodinámicas, se encontró una correlación positiva de la SrcO₂ con la SvcO₂ en todas las determinaciones, siendo más significativa a las 4 h (r=0,73, p<0,01). También fue positiva con la PAM en todas las determinaciones, excepto la realizada a las 8 h del día siguiente, obteniéndose igualmente un mayor valor del coeficiente de correlación a las 4 h (r=0,59, p<0,01). Entre la SrcO₂ y la ETO₂, la correlación fue negativa en todas las determinaciones, consiguiéndose también un valor mayor de correlación a las 4 h (r=-0,7, p<0,01). No se obtuvo ningún tipo de correlación con los niveles de lactato.

En el análisis de las escalas inotrópica e inotrópica-vasoactiva, se obtuvo una correlación moderada negativa solo a las 8 h del día siguiente de la intervención, tanto en la escala inotrópica (r=0,4, p<0,01) como en la inotrópica-vasoactiva (r=0,4, p<0,01).

El análisis de concordancia se realizó exclusivamente a las 4 h, ya que fue en ese momento donde el análisis de correlación entre las variables resultó ser estadísticamente más significativo. Los valores de la ETO₂ ≥ 0,4 se correspondieron con una SrcO₂ ≤ 60 en el 23,3% de los casos, y los valores ≤ 0,4 lo hicieron con una SrcO₂ > 60 en el 55,8% (índice Kappa = 0,532; p < 0,001). La SvcO₂ > 65 presentó una concordancia con una SrcO₂ > 60 en el 41,9% de los casos y la SvcO₂ ≤ 65 se correspondió con una SrcO₂ ≤ 60 en el 32,6% (índice Kappa = 0,506; p < 0,001). El índice Kappa obtenido (0,5) en ambas comparaciones indica una buena concordancia, que es significativamente distinta (p < 0,001) de la simplemente esperada por el azar.

Se estudiaron las curvas COR, estableciéndose un punto de corte de la SrcO₂ en 60, para así determinar la capacidad predictiva que poseen las variables hemodinámicas con respecto a la SrcO₂. Se obtuvieron áreas bajo la curva COR ≥ 0,7, correspondientes a test buenos o muy buenos desde el punto de vista estadístico (tabla 4).

Tabla 4 Valor predictivo de las variables hemodinámicas con respecto a la SrcO₂

	ABC	IC del 95%	p
PAM 4 h	0,84	0,72-0,96	< 0,01
ETO ₂ 4 h	0,86	0,74-0,98	< 0,01
ETO ₂ 8 h	0,71	0,52-0,90	< 0,05
SvcO ₂ 4 h	0,88	0,78-0,98	< 0,01
SvcO ₂ 8 h	0,76	0,57-0,95	< 0,05

ABC: área bajo la curva COR; ETO₂ 4h: extracción tisular de oxígeno a las 4 h; ETO₂ 8h: extracción tisular de oxígeno a las 8 h; IC del 95%: intervalo de confianza del 95%; SvcO₂ 4 h: saturación venosa central de oxígeno a las 4 h; SvcO₂ 8 h: saturación venosa central de oxígeno a las 8 h; PAM 4 h: presión arterial media a las 4 h.

Discusión

En situaciones de shock con hipoperfusión, se producen un descenso de la PAM y una reducción del aporte de oxígeno a los tejidos, esto provoca un aumento de la ETO₂ y, como consecuencia de ello, una reducción de la SvcO₂. La incidencia de hipoperfusión tras la cirugía cardíaca en un estudio realizado en adultos, se puso de manifiesto mediante la determinación de la SvcO₂ y del lactato, de forma que los pacientes con un descenso de la SvcO₂ < 70% y una elevación del lactato ≥ 4 mmol/L, tuvieron peor pronóstico⁹. Estos hallazgos también han sido corroborados en niños intervenidos de cardiopatías congénitas¹⁰.

En este estudio se ha comprobado que la SrcO₂ se correlaciona positivamente con la PAM y la SvcO₂ (figs. 2 y 3), de manera que cuando el valor de estas 2 variables aumenta, por una mejora del estado hemodinámico, también aumenta la SrcO₂. Por el contrario, la SrcO₂ se correlaciona negativamente con la ETO₂ (fig. 4), pues cuando aumenta la ETO₂ por un estado de hipoperfusión por shock o insuficiencia cardíaca, se produce un descenso de la SrcO₂.

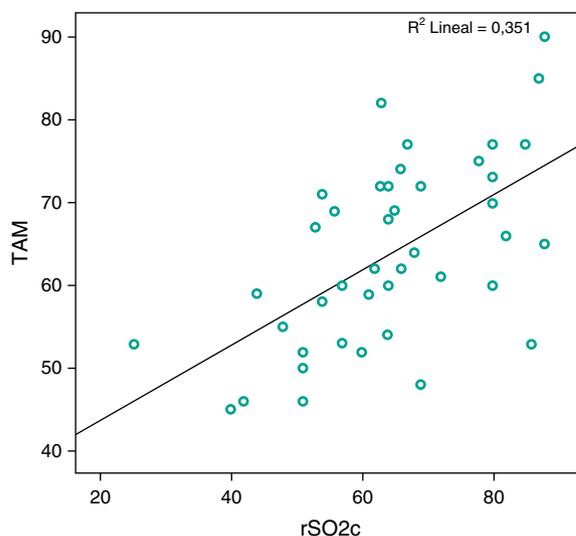


Figura 2 Correlación positiva entre la SrcO₂ y la PAM a las 4 h (r=0,6; p<0,01). PAM: presión arterial media; SrcO₂: saturación regional cerebral de oxígeno.

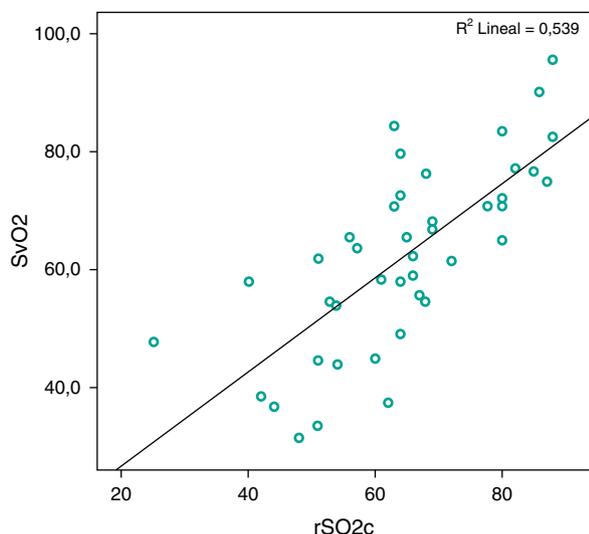


Figura 3 Correlación positiva entre la SrcO₂ y la SvcO₂ a las 4 h ($r=0,7$, $p<0,01$). SrcO₂: saturación regional cerebral de oxígeno; SvcO₂: saturación venosa central de oxígeno.

Los estados de hipoperfusión es conveniente identificarlos en el periodo postoperatorio inmediato, ya que un prolongado descenso de la SrcO₂ hasta un valor de 45% por un periodo de 180 min se ha asociado a la aparición de lesiones cerebrales o empeoramiento de las existentes en las imágenes de la resonancia magnética¹. Estudios en adultos sugieren que puede producirse isquemia cerebral cuando la SrcO₂ desciende más de un 10%, y en niños si el valor llega a ser del 50%⁶.

La buena correlación que se ha obtenido en este estudio entre la SrcO₂ y la SvcO₂ se puede explicar porque la sangre venosa, donde se determina la saturación de oxígeno, procede de un catéter colocado en el territorio de la vena cava superior que recoge sangre del cerebro¹¹. Otros

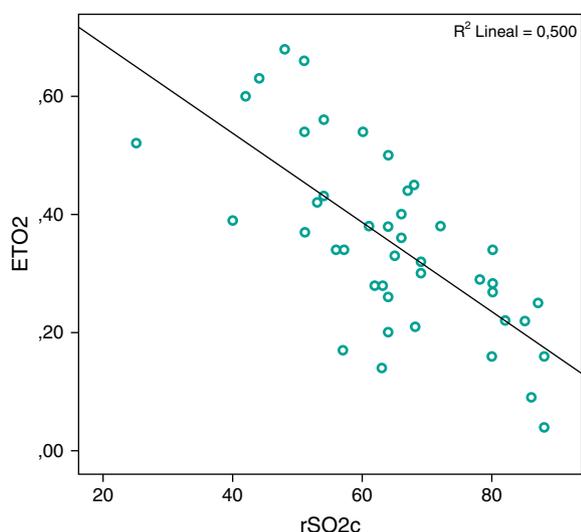


Figura 4 Correlación negativa entre la SrcO₂ y la ETO₂ a las 4 h ($r=-0,7$, $p<0,01$). ETO₂: extracción tisular de oxígeno; SrcO₂: saturación regional cerebral de oxígeno.

autores también han encontrado una asociación significativa ($r=0,58$, $p<0,001$) entre la SrcO₂ y la ScvO₂¹², esta última medida en la cava superior mediante el catéter de fibra óptica Peditasat².

Sin embargo, en determinados pacientes y situaciones clínicas, la SrcO₂ no predice la SvcO₂ y, por ello, no puede ser considerada su sustituto^{13,14}. Por ejemplo, en niños intervenidos de Norwood por presentar el síndrome de hipoplasia de cavidades izquierdas, la SrcO₂ se ha correlacionado fuertemente con la PAM, pero débilmente con la SvcO₂, la SaO₂, el flujo pulmonar, el flujo sistémico, el aporte de oxígeno y la extracción de oxígeno, y pobremente con el consumo de oxígeno¹⁴. En los resultados expuestos en el apartado anterior, se ha puesto de manifiesto un aceptable nivel de concordancia entre la SrcO₂ y las variables hemodinámicas SvcO₂ y ETO₂, lo cual indica que las variaciones de cada una de estas 2 variables se corresponden con variaciones concordantes de la SrcO₂.

La monitorización de la SrcO₂, al ser una técnica continua, no invasiva y fácil de realizar, puede detectar precozmente estados de hipoperfusión por bajo gasto cardíaco o shock. Sin embargo, debemos ser cautos al extrapolar las medidas de un territorio como el cerebral a todo el organismo, ya que la SrcO₂ puede reflejar solo cambios locales y no necesariamente indicar hipoperfusión en todo el organismo¹. Por el contrario, la medida de la ScvO₂ en la cava superior es mucho más específica y fiable del estado hemodinámico, ya que nos da una información más global de todo el territorio sistémico.

La medición de la SrcO₂ se ha incorporado en la monitorización postoperatoria de las cardiopatías congénitas, pero siempre junto a otras variables hemodinámicas de valor ya contrastado, como la PAM, la diuresis, la SvcO₂, la ETO₂, el lactato, etc. La SrcO₂ posee además una elevada capacidad para predecir la evolución postoperatoria tras la cirugía, como se ha demostrado en un estudio en el que los pacientes que presentaron un descenso postoperatorio durante 48 h a un valor del 52,8% tuvieron peor pronóstico que los que presentaron un valor del 60,8%¹⁵.

Las diferencias encontradas en la SrcO₂ entre los distintos grupos de edad podrían estar condicionadas por el grado de complejidad de las intervenciones quirúrgicas, ya que esto condiciona un curso postoperatorio más complicado. De este modo, los neonatos, que fueron los que tuvieron mayor nivel de complejidad quirúrgica en la escala RACHS-1, presentaron valores más bajos de la SrcO₂ (fig. 1). Sin embargo, es conocido también que en condiciones basales la SrcO₂ varía dependiendo de la edad del paciente, siendo el valor medio en niños por debajo de un año de $62,7 \pm 8$, y por encima de un año de $70,4 \pm 6$.

Limitaciones del estudio: aunque en este trabajo las discordancias son muy escasas, sería conveniente realizar estudios multicéntricos con un mayor número de casos para corroborar estos hallazgos.

Como conclusiones, podemos afirmar que: a) la SrcO₂, medida en el postoperatorio de las cardiopatías congénitas, se modifica significativamente dependiendo de la edad del paciente; b) las variaciones producidas en la SrcO₂ presentan una correlación estadística significativa con variables hemodinámicas, como la PAM, la ScvO₂ y la ETO₂, y no con variables respiratorias, y c) por último, la SrcO₂ se puede

considerar como un parámetro que nos informa del estado de perfusión cerebral, el cual depende directamente del estado hemodinámico.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

A la Prof. Dra. Mercedes Loscertales Abril, por el entusiasmo que nos transmite y por su entrega en la consecución de objetivos para una mejor asistencia clínica.

Bibliografía

- Hirsch JC, Charpie JR, Ohye RG, Gurney JG. Near infrared spectroscopy (NIRS) should not be standard of care for postoperative management. *Semin Thorac Cardiovasc Surg Pediatr Card Surg Annu.* 2010;13:51–4.
- Ranucci M, Isgro G, De la Torre T, Romitti F, Conti D, Carlucci C. Near-infrared spectroscopy correlates with continuous superior vena cava oxygen saturation in pediatric cardiac surgery patients. *Paediatr Anaesth.* 2008;18:1163–9.
- Li J, Van Arsdell GS, Zhang G, Cai S, Humpl T, Caldarone CA, et al. Assessment of the relationship between cerebral and splanchnic oxygen saturations measured by near-infrared spectroscopy and direct measurements of systemic haemodynamic variables and oxygen transport after the Norwood procedure. *Heart.* 2006;92:1678–85.
- Mildh L, Pettilä V, Sairanen H, Rautiainen P. Predictive value of paediatric risk of mortality score and risk adjustment for congenital heart surgery score after paediatric open-heart surgery. *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2007;6:628–31.
- Jenkins KJ, Gauvreau K, Newburger JW, Spray TL, Moller JH, Iezzoni LI. Consensus-based method for risk adjustment for surgery for congenital heart disease. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2002;123:110–8.
- Kussman BD, Wypij D, DiNardo JA, Newburger J, Jonas RA, Bartlett J, et al. An evaluation of bilateral monitoring of cerebral oxygen saturation during pediatric cardiac surgery. *Anesth Analg.* 2005;101:1294–300.
- Astiz ME, Rackow EC. Assessing perfusion failure during circulatory shock. *Crit Care Clin.* 1993;9:299–312.
- Barry P, Morris K, Ali T. Vascular access and clinical monitoring. Chapter 6. *Paediatric Intensive Care.* New York: Oxford University Press; 2010. p. 88.
- Hu BY, Laine GA, Wang S, Solis RT. Combined central venous oxygen saturation and lactate as markers of occult hypoperfusion and outcome following cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2012;26:52–7.
- García-Hernández JA, Benítez-Gómez IL, Martínez-López AI, Praena-Fernández JM, Cano-Franco J, Loscertales-Abril M. Prognostic markers of mortality after congenital heart defect surgery. *An Pediatr.* 2012;77:366–73.
- Marimón GA, Dockery WK, Sheridan MJ, Agarwal S. Near-infrared spectroscopy cerebral and somatic (renal) oxygen saturation correlation to continuous venous oxygen saturation via intravenous oximetry catheter. *J Crit Care.* 2012;27:314.e13–8.
- Tortoriello TA, Stayer SA, Mott AR, McKenzie ED, Fraser CD, Andropoulos DB, et al. A noninvasive estimation of mixed venous oxygen saturation using near-infrared spectroscopy by cerebral oximetry in pediatric cardiac surgery patients. *Paediatr Anaesth.* 2005;15:495–503.
- McQuillen PS, Nishimoto MS, Bottrell CL, Fineman LD, Hamrick SE, Glidden DV, et al. Regional and central venous oxygen saturation monitoring following pediatric cardiac surgery: concordance and association with clinical variables. *Pediatr Crit Care Med.* 2007;8:154–60.
- Li J, Van Arsdell GS, Zhang G, Cai S, Humpl T, Caldarone CA, et al. Assessment of the relationship between cerebral and splanchnic oxygen saturations measured by near-infrared spectroscopy and direct measurements of systemic haemodynamic variables and oxygen transport after the Norwood procedure. *Heart.* 2006;92:1678–85.
- Phelps HM, Mahle WT, Kim D, Simsic JM, Kirshbom PM, Kanter KR, et al. Postoperative cerebral oxygenation in hypoplastic left heart syndrome after the Norwood procedure. *Ann Thorac Surg.* 2009;87:1490–4.