

Utilidad del monitoreo hemodinámico con espectroscopia cercana infrarroja en pediatría

Use of near infrared spectroscopy for hemodynamic monitoring in pediatrics

Diego A. Brandoni^a , M. Paula Martínez Da Bove^a , Guillermo E. Moreno^a 

RESUMEN

La espectroscopia cercana infrarroja (NIRS, por su sigla en inglés), es una técnica óptica no invasiva y no ionizante utilizada para medir la oxigenación tisular regional a través de sensores transcutáneos. En los últimos años, han aumentado de manera exponencial las publicaciones sobre este tema; esto refleja el creciente interés de investigadores y clínicos por la utilización de esta nueva tecnología y los beneficios que podría ofrecerles a los pacientes pediátricos. El objetivo de esta revisión es dar a conocer el funcionamiento y las posibles aplicaciones de la saturación regional medida por NIRS, así como los desafíos en el futuro.

Palabras clave: espectroscopia NIR, oximetría transcutánea, procedimientos quirúrgicos cardíacos, monitorización hemodinámica, gasto cardíaco bajo.

<http://dx.doi.org/10.5546/aap.2022.129>

Texto completo en inglés:

<http://dx.doi.org/10.5546/aap.2022.eng.129>

Cómo citar: Brandoni DA, Martínez Da Bove MP, Moreno GE. Utilidad del monitoreo hemodinámico con espectroscopia cercana infrarroja en pediatría. *Arch Argent Pediatr* 2022;120(2):129-135.

a. Unidad de Recuperación Cardiovascular (UCI 35), Hospital de Pediatría S.A.M.I.C. "Prof. Dr. Juan P. Garrahan", Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Correspondencia:
Diego A. Brandoni:
diego.brandoni@gmail.com

Financiamiento:
Ninguno.

Conflicto de intereses:
Ninguno que declarar.

Recibido: 24-3-2021
Aceptado: 9-9-2021

INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos permiten utilizar nuevas herramientas para el monitoreo de los pacientes críticos. Se realizó una revisión no sistemática sobre una de ellas, la espectroscopia cercana infrarroja (NIRS, por su sigla en inglés), con el objetivo de dar a conocer los principios básicos de su funcionamiento y las posibles aplicaciones en los pacientes pediátricos.

HISTORIA Y COMIENZOS

La primera publicación sobre NIRS data de 1977 en la revista *Science*,¹ donde Frans Jöbsis demostró la posibilidad de medir los cambios en el equilibrio hemoglobina-

oxihemoglobina mediante la transiluminación infrarroja de corazones y cerebros experimentales.

Diez años más tarde, Ferrari *et al.*,² demostraron correlación entre el descenso de la saturación medida por NIRS y el enlentecimiento de la actividad electroencefalográfica en pacientes adultos sometidos a endarterectomía carotídea.

Desde principios de los 2000, se publicaron varias investigaciones con el objetivo de validar el uso de NIRS en pacientes pediátricos: Nagdyman *et al.*,³ estudiaron 43 niños luego de ser operados de cardiopatías congénitas para determinar la relación entre el índice de oxigenación tisular cerebral (TOI, por su sigla en inglés) y la saturación venosa central de oxígeno (SvO₂). El TOI describe la relación entre la hemoglobina oxigenada y la hemoglobina total, medido por NIRS. Los valores de SvO₂ medidos revelaron una correlación significativa con el índice de oxigenación cerebral con un coeficiente de correlación de Pearson de 0,52 y una $p < 0,001$. En otro estudio prospectivo,⁴ el mismo autor comparó el TOI medido por NIRS con la saturación venosa de oxígeno medida en el bulbo yugular en niños y demostró nuevamente una correlación significativa entre los dos valores con una especificidad alta (91 %), pero una sensibilidad baja (46 %).

También se ha encontrado correlación entre NIRS y la pletismografía. Un estudio de 2007 demostró una correlación intraclase de 0,93 para el método NIRS como indicador de perfusión distal.⁵ Otro

estudio previo demostró que el flujo sanguíneo del antebrazo estimado por NIRS se correlacionó con un $r = 0,853\sim 0,981$ y una $p < 0,001$ con el flujo sanguíneo estimado por pletismografía.⁶

Si bien en los comienzos el NIRS se utilizó como subrogante del flujo sanguíneo regional cerebral, su uso se ha ido extendiendo hacia otras aplicaciones, como veremos más adelante.

DEFINICIÓN Y FUNCIONAMIENTO

La saturación de oxígeno medida por NIRS es una técnica óptica que permite la medición continua, en tiempo real y de manera no invasiva, del balance entre la disponibilidad (DO_2) y el consumo (VO_2) regional de oxígeno (Figura 1), basándose en el principio de que distintas sustancias absorben y dispersan la luz infrarroja en distintos grados a varias longitudes de onda.

Un espectrómetro infrarrojo emite luz hacia una muestra y mide la proporción de luz reflejada dentro de un amplio rango de longitudes de onda. Utilizando el principio de Beer-Lambert modificado, mide las concentraciones relativas de hemoglobina saturada y desaturada, lo que produce una evaluación continua y no invasiva de la saturación tisular de oxígeno a través de una evaluación cuantitativa del color de la hemoglobina en sangre en el campo óptico debajo del sensor.

A diferencia de la oximetría de pulso, los dispositivos NIRS reflejan la captación de oxígeno en el lecho tisular; esto se denomina saturación de oxígeno regional (rSO_2). En otras palabras, miden el balance entre el oxígeno que se entrega al tejido y el que se extrae de este a nivel tisular. La

medición continua de oxigenación tisular refleja el estado de perfusión y permite monitorear las variaciones en tiempo real, para anticiparse al *shock*.⁷⁻¹¹

La medición de estos valores se obtiene a través de la colocación de un sensor en la piel de la zona que se quiera medir: frente (cerebro) (Figura 2), abdomen (mesenterio), zona lumbar (renal).

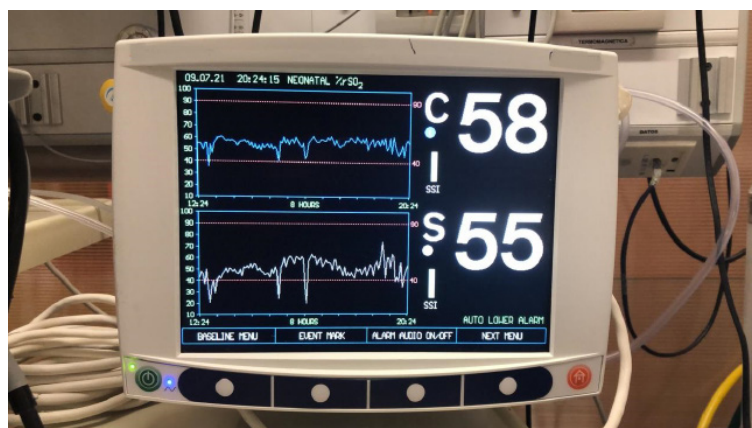
En general, se utilizan dos sensores para evaluar dos modelos de circulación diferentes. Cada sensor consta de una fuente de luz y dos fotodetectores. Los fotones emitidos por la fuente se dispersan en el lecho tisular; los que no se absorben se devuelven al fotodetector de piel. El valor de saturación de oxígeno medida por NIRS representa la cantidad de luz absorbida en el lecho. Esta medida representa un promedio de oxigenación arterial, venosa y capilar; el 75-80 % corresponde a la parte venosa.¹²

Estas mediciones deben ser interpretadas en el contexto del paciente, ya que un valor bajo puede deberse a que la extracción de oxígeno sea mayor (como en el *shock*) o a que exista disminución de flujo sanguíneo (isquemia) en dicha región y que por esto se altere la entrega de oxígeno tisular.

VALORES NORMALES

Kurth *et al.*, publicaron en 2001 un estudio en el que midieron la saturación cerebral regional (ScO_2) mediante NIRS en pacientes pediátricos con cardiopatías congénitas antes de someterse a cirugía cardiovascular y en individuos sanos. Encontraron que la ScO_2 media fue del 68 % (desviación estándar $DE \pm 10$ %) en niños sanos

FIGURA 1. Monitor de espectroscopia cercana infrarroja (NIRS, por su sigla en inglés). En la derecha de la pantalla, se ven los valores de saturación regional cerebral (arriba) y somática (abajo); a la izquierda, la curva de tendencia de saturación regional en función del tiempo



y en cardiopatías no cianóticas. En pacientes con cardiopatías cianóticas (trasposición de grandes vasos, atresia pulmonar) fue más baja: 47 ± 11 y 38 ± 6 respectivamente.¹³

Definir valores normales para la saturación somática regional de oxígeno (SsO_2) en la pared abdominal o en la celda renal resulta más difícil; esta depende del peso y la edad del paciente, del grosor de la pared abdominal, así como del monitor utilizado y el sitio por evaluar. Por ejemplo, la SsO_2 medida en la celda renal se correlaciona con la saturación de oxígeno en la vena renal y en la vena cava inferior solo en los pacientes menores de 10 kg. Otro estudio¹⁴ demostró buena correlación entre los valores de SsO_2 en la región infraumbilical con el flujo sanguíneo medido por Doppler en la arteria mesentérica superior en pacientes neonatos que no presentaban ascitis ni edema en la pared abdominal.

Debido a esta dificultad para estandarizar valores normales de SsO_2 , podría resultar útil la diferencia de saturación somático-cerebral que en pacientes sanos es entre el 10 % y el 20 %, siendo normalmente mayor la SsO_2 debido a la mayor extracción de oxígeno de la circulación cerebral. En un estudio publicado en 2010, Bernal *et al.*,¹⁵ monitorizaron neonatos sanos con un dispositivo NIRS colocado en la región frontal y en el flanco derecho a nivel de T2-L2, y encontraron que la diferencia de saturación somático-cerebral promedio fue del $8,9 \% \pm 9,4 \%$. En situaciones patológicas, donde se redistribuye la circulación preservando el lecho cerebral, la diferencia se acerca al 0 % o se vuelve negativa. Hanson *et al.*,¹⁶ demostraron que la diferencia de saturación

somático-cerebral en pacientes deshidratados ingresados al servicio de emergencias era baja y aumentaba con la resucitación con fluidos, lo que comprueba una relación dosis-respuesta.

La implementación de la saturación de oxígeno con NIRS multinivel con mediciones simultáneas de ScO_2 y SsO_2 permite la detección temprana de situaciones de bajo gasto cardíaco a través de la detección de cambios en la diferencia somático-cerebral.

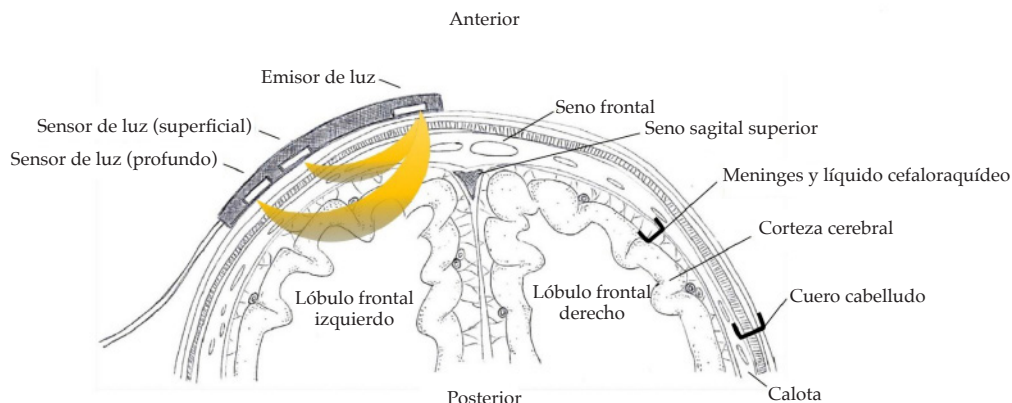
USOS ACTUALES

Cirugía cardiovascular

La cirugía cardiovascular pediátrica fue una de las primeras disciplinas en adoptar la determinación de la saturación de oxígeno medida por NIRS. Las alteraciones en el neurodesarrollo son frecuentes en los sobrevivientes de cirugías por cardiopatías congénitas y, aun teniendo una etiología multifactorial, el pronóstico puede mejorar parcialmente con un adecuado neuromonitoreo en el perioperatorio.¹⁷⁻²¹

Austin *et al.*,¹⁷ fueron los primeros en reportar resultados neurológicos mejorados con la incorporación de NIRS en un algoritmo de monitoreo neurofisiológico multimodal en pacientes sometidos a circulación extracorpórea (CEC). En su estudio de 1997, demostraron que, de los pacientes que recibieron intervención según el algoritmo basado en medición de la ScO_2 medida por NIRS, el flujo sanguíneo cerebral medido por Doppler transcraneal y monitoreo electroencefalográfico, solo el 6 % tuvo secuelas neurológicas (convulsiones, alteraciones motoras, de la visión o hipoacusia) versus el 26 % en el grupo que no siguió el algoritmo ($p < 0,001$).

FIGURA 2. Saturación regional de oxígeno cerebral. Se observa un corte axial a nivel frontal en donde la luz viaja en trayectoria curvilínea por el tejido subyacente y es absorbida por los fotodetectores



Extraído de Zaleski KL, Kussman BD. Near infrared spectroscopy in pediatric congenital heart disease", *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2020;34(2):489-500.

Sin embargo, continúa el debate sobre la utilidad clínica de NIRS en la etapa perioperatoria cardiovascular y aún faltan ensayos aleatorizados controlados en población pediátrica que asocien en forma coherente los valores bajos de NIRS cerebral con pobres resultados neurológicos.¹⁸

Estudios observacionales prospectivos han evaluado la relación entre NIRS cerebral y somático, y otros indicadores de metabolismo anaeróbico. En una serie de 20 casos,¹⁹ la SsO₂ en el flanco posterolateral y abdominal anterior demostró una fuerte correlación con la oximetría venosa central y los valores de lactato dentro de las 48 horas posquirúrgicas. En un estudio similar de 23 lactantes, se grabó la saturación regional de oxígeno (rSO₂) cerebral, esplácnica, renal y muscular cada 30 segundos, y se compararon los valores de cada sitio con los niveles de lactato plasmático durante las primeras 24 horas posquirúrgicas. Se demostró la correlación más fuerte entre ScO₂ medida por NIRS y lactato. En esta serie, niveles de ScO₂ menores al 65 % en niños acianóticos predijeron un nivel de lactato mayor a 3 mmol/l con una sensibilidad del 95 % y una especificidad del 83 %.^{7,20}

En una serie de 79 pacientes con hipoplasia de corazón izquierdo (HLHS) sometidos a cirugía de estadio 1 de ventrículo único, la SsO₂ menor al 60 % y una diferencia entre la ScO₂ y SsO₂ cercana a cero se correlacionó con *shock*, complicaciones posquirúrgicas y mayor estadía en la unidad de cuidados intensivos (UCI) con una $p < 0,01$.²¹

Hickok *et al.*,²² publicaron en 2016 un estudio prospectivo observacional, donde analizaron la relación entre saturación de oxígeno medida por NIRS baja y desarrollo de síndrome de bajo gasto cardíaco (BGC) en 27 neonatos con cardiopatía congénita sometidos a cirugía cardíaca. De ellos, 11 (40 %) desarrollaron BGC definido como pH menor a 7,3, lactato mayor a 4 mmol/l o la necesidad de agregar un nuevo agente vasoactivo al tratamiento. Como resultados, obtuvieron que un valor constante de SsO₂ medida por NIRS menor al 58 % tuvo una sensibilidad del 100 % y una especificidad del 69 % para detectar BGC, mientras que una variabilidad en los valores de NIRS menor al 0,8 % tuvo una sensibilidad del 55 % y una especificidad del 94 % para predecir el desarrollo de BGC. Dentro del grupo de pacientes en los que se diagnosticó BGC, la media de ScO₂ y SsO₂ en la celda renal fueron del 48 % y del 50 % respectivamente, en concordancia con los datos obtenidos de otras investigaciones sobre la correlación entre una diferencia entre NIRS

cerebral y somático menor al 10 % como predictor de BGC.

Un estudio con mayor número de pacientes (n = 329) publicado por Hoffman *et al.*,²³ en 2017 concluyó que las mediciones de NIRS durante el posoperatorio de cardiopatías congénitas en neonatos permitieron detectar hipoxia-isquemia regional aun en ausencia de una disminución global de la SvO₂. Además, la saturación regional medida por NIRS fue el mejor predictor no invasivo de uso de oxigenación por membrana extracorpórea (ECMO, por su sigla en inglés) en las primeras 6 horas posoperatorias con un área bajo la curva ROC de 0,716.

Enterocolitis necrosante

La enterocolitis necrosante (ECN) es la enfermedad gastrointestinal más grave que se presenta en neonatos. Se asocia a resultados perjudiciales a corto y largo plazo, incluidas altas tasas de mortalidad y deterioro del desarrollo neurológico.²⁴ La fisiopatología de esta entidad aún no ha sido completamente dilucidada; se cree que el mecanismo involucra una compleja interacción entre varios factores: inmadurez de la mucosa intestinal neonatal, isquemia mesentérica, hipoxia tisular, alimentación enteral y la presencia de agentes infecciosos o toxinas. La ECN es más frecuente en neonatos pretérmino; sin embargo, un 10 % se presenta en nacidos a término o pretérmino tardío. En estos pacientes existen factores de riesgo adicionales que los predisponen a isquemia intestinal, como cardiopatía congénita, restricción del crecimiento intrauterino o asfisia al nacer.

McElhinney *et al.*,²⁵ encontraron que los pacientes con HLHS, corazón univentricular con interrupción del arco aórtico, tronco arterioso, ventana aortopulmonar tuvieron tasas significativamente más altas de ECN que aquellos con otros tipos de cardiopatías.

Estos hallazgos concuerdan con lo reportado por DeWitt *et al.*,²⁶ en su estudio de 2014, en el que se comparó el riesgo de presentar ECN en pacientes con patología biventricular (30 pacientes) y univentricular (34 pacientes). Presentaron ECN 11 de ellos, todos pertenecientes al grupo univentricular. Los pacientes con ECN diagnosticada tuvieron una rSO₂ esplácnica más baja (32,6 % vs. 47,0 %, $p = 0,05$), y mayor proporción de tiempo con SsO₂ menor al 30 % (48,8 % vs. 6,7 %, $p = 0,04$) que el grupo sin ECN. Esto demuestra una diferencia en la oxigenación regional comprobada por NIRS en los pacientes que desarrollan ECN.

Circulación extracorpórea

Ha ido aumentando con los años la utilización de la determinación de saturación de oxígeno medida por NIRS como herramienta de monitoreo hemodinámico en pacientes sometidos a cirugías cardíacas con requerimiento de circulación extracorpórea (CEC). En una encuesta internacional realizada a perfusionistas,¹⁸ se reportó un uso del 74 % de ScO₂ medida por NIRS durante la circulación extracorpórea. En otra, realizada en Estados Unidos, el 97 % de las instituciones informaron utilizar la oximetría regional cerebral durante el procedimiento de Norwood para HLHS.¹⁸

Un estudio realizado por Haydin *et al.*,²⁷ comparó los valores de saturación de oxígeno cerebral medida por NIRS, presión arterial media (PAM), lactato y flujo de bomba durante cirugías cardiovasculares pediátricas que utilizaron CEC e hipotermia. Dividieron para esta comparación el tiempo de bomba en 5 etapas: 1) inicio de CEC, 2) enfriamiento hasta 32 °C, 3) temperatura objetivo final, 4) recalentamiento hasta 32 °C, 5) antes del fin de CEC. Los niveles de ScO₂ mostraron cambios entre las 5 etapas estudiadas; se observó un aumento significativo durante la etapa de enfriamiento comparado con la etapa 1 ($p < 0,05$). No se halló un cambio significativo durante el enfriamiento para los otros parámetros estudiados. Estos investigadores concluyeron que la saturación de oxígeno cerebral medida por NIRS es una herramienta efectiva para trabajar en forma segura monitorizando la disminución del consumo de oxígeno y la protección cerebral correspondiente.

Oxigenación por membrana extracorpórea

En relación con la utilidad de la determinación de ScO₂ medida por NIRS en ECMO, en 2020 se publicó un estudio de cohorte retrospectivo observacional realizado por Tsou *et al.*,²⁸ en el que se analizaron 156 ingresos a ECMO entre 2008 y 2014. El resultado final evaluado fue determinar el estatus neurológico al alta mediante la escala de funcionamiento cerebral pediátrico. Estos autores encontraron que la proporción de pacientes con un valor de ScO₂ menor al 40 %, o una caída mayor al 20 % de la ScO₂ basal fue significativamente mayor en el grupo con resultados neurológicos desfavorables al alta. Dichos valores se asociaron tanto a mortalidad previa al alta como a hallazgos patológicos en neuroimágenes (*stroke* y lesión global posasfíxia).

Basado en estas publicaciones, el uso de

NIRS en ECMO podría ayudar a identificar a los pacientes en riesgo de muerte o de resultados neurológicos desfavorables, y permitiría implementar medidas terapéuticas tempranamente.

OTROS POSIBLES USOS

Reconocimiento temprano del *shock*

El *shock* en pediatría resulta en una alta mortalidad y morbilidad en todo el mundo, su reconocimiento y tratamiento temprano son cruciales para disminuirlas. A diferencia del adulto, la hipotensión arterial es un signo tardío de *shock* en niños.²⁹

Pichler *et al.*,³⁰ compararon los episodios de hipotensión en dos grupos de neonatos (NIRS vs. control). En el grupo NIRS, se midió la diferencia cerebral-somática de rSO₂ cada 6 horas. Cuando dicha diferencia superó el 5 %, se lo consideró signo temprano de centralización de la circulación (comienzo del choque) y se iniciaron medidas para optimizar la perfusión (volumen, inotrópicos). En el grupo control, las mediciones de saturación de oxígeno medidas por NIRS no eran visibles para el equipo tratante, por lo que se mantuvieron las medidas estándar del servicio. Los autores del presente trabajo concluyeron que la utilización de la diferencia cerebral-somática de la rSO₂ medida por NIRS podría favorecer la detección temprana de alteraciones en la microcirculación, antes de que se vuelvan clínicamente evidentes.

Monitoreo de perfusión periférica

Recientemente se han publicado reportes^{31,32} sobre el uso de la saturación de oxígeno medida por NIRS para monitorizar la perfusión periférica luego de traumatismo de miembros inferiores o luego de canulación de la arteria femoral para CEC.

En 2019, Herbet *et al.*,³³ realizaron un estudio donde se evaluó la utilidad de la SrO₂ medida por NIRS para determinar el riesgo de oclusión arterial luego de la realización de cateterismo cardíaco en 152 pacientes. Se tomaron las mediciones de SrO₂ medida por NIRS colocando sensores en forma bilateral, en la región posterolateral de ambas pantorrillas. Se constató un descenso significativo de saturación regional en la extremidad intervenida comparada con la contralateral. Los valores de SrO₂ medida por NIRS no se correlacionaron con la valoración subjetiva de la perfusión periférica. Un paciente tuvo como complicación la pérdida del pulso, que requirió tratamiento con heparina, y en este caso

hubo un claro descenso de la saturación regional con una mejoría gradual luego del comienzo del tratamiento.

Neurocirugía

En la actualidad no existen métodos no invasivos para la medición de la presión intracraneal. Lang *et al.*,³⁴ propusieron utilizar la medición de la ScO₂ medida por NIRS para evaluar la perfusión cerebral en niños que presentaban hidrocefalia con hipertensión endocraneal y que iban a someterse a cirugía. Compararon la ScO₂ antes y después de realizar la derivación de líquido cefalorraquídeo en 22 pacientes. Se encontró una diferencia significativa en las mediciones de ScO₂ medida por NIRS, sugestiva de una mejoría en la oxigenación cerebral, que se correlacionó con la resolución de los síntomas de hipertensión endocraneal luego de la recuperación anestésica.

Transfusiones

Es bien conocido que los valores absolutos y aislados de hematocrito y hemoglobina no deben ser los únicos parámetros para tener en cuenta a la hora de indicar transfusiones de glóbulos rojos. Una posible estrategia para guiar el soporte transfusional podría ser la fracción de extracción tisular de oxígeno (FTOE, *por su sigla en inglés*) como medida subrogante de la relación oferta-demanda de oxígeno cerebral. Este indicador deriva de la relación entre saturación arterial de oxígeno y saturación regional medida por NIRS. Neunhoeffler *et al.*,³⁵ propusieron utilizar una FTOE elevada como marcador de necesidad de transfusión. Incluyeron 62 neonatos y lactantes menores de 6 meses a los que se les había realizado una cirugía mayor (cardiopatías, hernia diafragmática y onfalocele). Encontraron una franca mejoría de la saturación regional cerebral luego de la transfusión, especialmente en pacientes con una FTOE cerebral mayor a 0,4.

Trasplante

Una revisión sistemática de 2021³⁶ encontró que la medición de saturación de oxígeno medida por NIRS podría ser una herramienta útil también en trasplante hepático y renal. Analizaron cinco publicaciones pertinentes: tres de ellas investigaron perfusión del injerto en trasplante renal y las dos restantes se trataban de trasplante hepático. El principal hallazgo fue que la caída de la saturación regional anticipó complicaciones vasculares del injerto.

COMENTARIOS FINALES

La saturación de oxígeno medida por NIRS es un método de monitoreo que permite la medición no invasiva y en tiempo real del balance entre la disponibilidad y el consumo de oxígeno regional. Proporciona información continua de cambios entre el flujo cerebral y sistémico, y permite la detección temprana de eventos clínicos negativos.

En los últimos años se han incrementado los distintos usos no solo en los quirófanos, sino también en las terapias intensivas pediátricas y neonatales.

La precisión de la saturación de oxígeno medida por NIRS se puede comparar con mediciones invasivas como SvcO₂,^{3,4} siendo un excelente método complementario a esta última, y es de gran utilidad para monitorear perfusión cerebral en cirugías cardiovasculares.

Si se observa un valor absoluto de ScO₂ medido por NIRS menor a 50 o una caída del 20 % respecto al basal, se debe realizar alguna intervención: descartar trastornos ventilatorios (hipocapnia) o eventos que aumenten la demanda metabólica cerebral –como convulsiones o hipertermia–, optimizar analgosedación, controlar la SvO₂ y los niveles de hematocrito.

La utilidad de la saturación de oxígeno medida por NIRS en pacientes mayores es limitada. La mayoría de los estudios se enfocan en lactantes y neonatos. Otro obstáculo en la estandarización del uso es la gran variabilidad inter- e intraindividual de las mediciones; esto dificulta la obtención de puntos de corte y valores normales.³⁷

Se requiere un mayor número de ensayos aleatorizados controlados en población pediátrica que demuestren que la aplicación de la saturación de oxígeno medida por NIRS como estrategia de monitoreo hemodinámico habitual genere disminución en la mortalidad o en los días de internación, y justifiquen el costo inherente a toda tecnología novedosa.

Comprender tanto el funcionamiento como las limitaciones de los dispositivos disponibles le permitirá a la SrO₂ medida por NIRS convertirse para el monitoreo circulatorio en lo que el saturómetro fue para el monitoreo respiratorio: proveer información continua y no invasiva que pueda aumentar significativamente el reconocimiento de estados de desequilibrio entre oferta y demanda de oxígeno a nivel de la microcirculación. ■

REFERENCIAS

1. Jöbsis FF. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters.

- Science*. 1977; 198(4323):1264-7.
2. Ferrari M, Zanette E, Sideri G, Giannini I, et al. Effects of carotid compression, as assessed by near infrared spectroscopy, upon cerebral blood volume and hemoglobin oxygen saturation. *J R Soc Med*. 1987; 80(2):83-7.
 3. Nagdyman N, Fleck T, Barth S, Abdul-Kahliq H, et al. Relation of cerebral tissue oxygenation index to central venous oxygen saturation in children. *Intensive Care Med*. 2004; 30(3):468-71.
 4. Nagdyman N, Fleck T, Schubert S, Ewert P, et al. Comparison between cerebral tissue oxygenation index measured by near-infrared spectroscopy and venous jugular bulb saturation in children. *Intensive Care Med*. 2005; 31(6):846-50.
 5. Harel F, Denault A, Ngo Q, Dupuis J, Khairy P. Near-infrared spectroscopy to monitor peripheral blood flow perfusion. *J Clin Monit Comput*. 2008; 22(1):37-43.
 6. Homma S, Eda H, Ogasawara S, Kagaya A. Near-infrared estimation of O₂ supply and consumption in forearm muscles working at varying intensity. *J Appl Physiol (1985)*. 1996; 80(4):1279-84.
 7. Ghanayem N, Hoffman G. Near Infrared Spectroscopy as a Hemodynamic Monitor in Critical Illness. *Pediatr Crit Care Med*. 2016; 17(8 Suppl 1):S201-6.
 8. Marrin T, Moore J. Understanding near-infrared spectroscopy. *Adv Neonat Care*. 2011; 11(6):382-8.
 9. McNeill S, Gatenby JC, McElroy S, Engelhardt B. Normal cerebral, renal and abdominal regional oxygen saturations using near-infrared spectroscopy in preterm infants. *J Perinatol*. 2011; 31(1):51-7.
 10. Tobias JD. Cerebral oximetry monitoring with near infrared spectroscopy detects alterations in oxygenation before pulse oximetry. *J Intens Care Med*. 2008; 23(6):384-8.
 11. Watzman HM, Kurth CD, Montenegro LM, Rome J, et al. Arterial and venous contributions to near-infrared cerebral oximetry. *Anesthesiology*. 2000; 93(4):947-53.
 12. Weiss M, Dullenkopf A, Kolarova A, Schulz G, et al. Near-infrared spectroscopic cerebral oxygenation reading in neonates and infants is associated with central venous oxygen saturation. *Paediatr Anaesth*. 2005; 15(2):102-9.
 13. Kurth CD, Steven JL, Montenegro LM, Watzman HM, et al. Cerebral oxygen saturation before congenital heart surgery. *Ann Thorac Surg*. 2001; 72(1):187-92.
 14. Gillam-Krakauer M, Cochran CM, Slaughter JC, Polavarapu S, et al. Correlation of abdominal rSO₂ with superior mesenteric artery velocities in preterm infants. *J Perinatol*. 2013; 33(8):609-612.
 15. Bernal NP, Hoffman GM, Ghanayem NS, Arca MJ. Cerebral and somatic near-infrared spectroscopy in normal newborns. *J Pediatr Surg*. 2010; 45(6):1306-10.
 16. Hanson SJ, Berens RJ, Havens PL, Kim MK, Hoffman GM. Effect of volume resuscitation on regional perfusion in dehydrated pediatric patients as measured by two-site near-infrared spectroscopy. *Pediatr Emerg Care*. 2009; 25(3):150-3.
 17. Austin EH 3rd, Edmonds HL Jr, Auden SM, Seremet V, et al. Benefit of neurophysiologic monitoring for pediatric cardiac surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 1997; 114(5):707-15; discussion 716.
 18. Zaleski KL, Kussman BD. Near-Infrared Spectroscopy in Pediatric Congenital Heart Disease. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2020; 34(2):489-500.
 19. Kaufman J, Almodovar MC, Zuk J, Friesen RH. Correlation of abdominal site near-infrared spectroscopy with gastric tonometry in infants following surgery for congenital heart disease. *Pediatr Crit Care Med*. 2008; 9(1):62-8.
 20. Chakravarti SB, Mittnacht AJ, Katz JC, Nguyen K, Joashi U. Multisite near-infrared spectroscopy predicts elevated blood lactate level in children after cardiac surgery. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2009; 23(5):663-7.
 21. Hoffman GM, Ghanayem NS, Mussatto KM, Berens RJ, Tweddell JS. Postoperative two-site NIRS predicts complications and mortality after stage one palliation of HLHS. *Anesthesiology*. 2007; 107:A234.
 22. Hickok RL, Spaeder MC, Berger JT, Schuette JJ, Klugman D. Postoperative abdominal NIRS values predict low cardiac output syndrome in neonates. *World J Pediatr Congenit Heart Surg*. 2016; 7(2):180-4.
 23. Hoffman GM, Ghanayem NS, Scott JP, Tweddell JS, et al. Postoperative Cerebral and Somatic Near-Infrared Spectroscopy Saturations and Outcome in Hypoplastic Left Heart Syndrome. *Ann Thorac Surg*. 2017; 103(5):1527-35.
 24. Schat TE, Schurink M, van der Laan ME, Hulscher JBF, et al. Near-Infrared Spectroscopy to Predict the Course of Necrotizing Enterocolitis. *PLoS One*. 2016; 11(5):e0154710.
 25. McElhinney DB, Hedrick HL, Bush DM, Pereira GR, et al. Necrotizing enterocolitis in neonates with congenital heart disease: risk factors and outcomes. *Pediatrics*. 2000; 106(5):1080-7.
 26. DeWitt AG, Charpie JR, Donohue JE, Yu S, Owens GE. Splanchnic near-infrared spectroscopy and risk of necrotizing enterocolitis after neonatal heart surgery. *Pediatr Cardiol*. 2014; 35(7):1286-94.
 27. Haydin S, Onan B, Onan IS, Ozturk E, et al. Cerebral perfusion during cardiopulmonary bypass in children: correlations between near-infrared spectroscopy, temperature, lactate, pump flow, and blood pressure. *Artif Organs*. 2012; 37(1):87-91.
 28. Tsou PY, Garcia AV, Yiu A, Vaidya DM, Bembea MM. Association of Cerebral Oximetry with Outcomes after Extracorporeal Membrane Oxygenation. *Neurocrit Care*. 2020; 33(2):429-37.
 29. Mendelson J. Emergency Department Management of Pediatric Shock. *Emerg Med Clin North Am*. 2018; 36(2):427-40.
 30. Pichler G, Höller N, Baik-Schneditz N, Schwabberger B, et al. Avoiding Arterial Hypotension in Preterm Neonates (AHIP)-A Single Center Randomised Controlled Study Investigating Simultaneous Near Infrared Spectroscopy Measurements of Cerebral and Peripheral Regional Tissue Oxygenation and Dedicated Interventions. *Front Pediatr*. 2018; 6:15.
 31. Schachner T, Bonaros N, Bonatti J, Kolbitsch C. Near infrared spectroscopy for controlling the quality of distal leg perfusion in remote access cardiopulmonary bypass. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2008; 34(6):1253-4.
 32. Vida VL, Padalino MA, Boccuzzo G, Stellin G. Nearinfrared spectroscopy for monitoring leg perfusion during minimally invasive surgery for patients with congenital heart defects. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2012; 143(3):756-7.
 33. Herbert CE, Leshko J, Morelli D, Amankwah E, et al. Use of Near-Infrared Spectroscopy to Monitor Lower Extremity Perfusion in Pediatric Patients Undergoing Cardiac Catheterization. *Pediatr Cardiol*. 2019; 40(7):1523-9.
 34. Lang S, Khanna O, Atkin NJ, Palma JE, et al. Perioperative near-infrared spectroscopy cerebral oxygen saturation in symptomatic pediatric hydrocephalus patients at risk for intracranial hypertension. *J Neurosurg Pediatr*. 2019; 1-7.
 35. Neunhoeffer F, Hofbeck M, Schuhmann MU, Fuchs J, et al. Cerebral Oxygen Metabolism Before and After RBC Transfusion in Infants Following Major Surgical Procedures. *Pediatr Crit Care Med*. 2018; 19(4):318-27.
 36. Ghidini F, Benetti E, Zucchetta P, Amigoni A, et al. Transcutaneous near-infrared spectroscopy (NIRS) for monitoring kidney and liver allograft perfusion. *Int J Clin Pract*. 2021; 75(5):e14034.
 37. Green MS, Sehgal S, Tariq R. Near-Infrared Spectroscopy: The New Must Have Tool in the Intensive Care Unit? *Semin Cardiothorac Vasc Anesth*. 2016; 20(3):213-24.