

Oximetría de pulso en la asistencia neonatal en 2005. Revisión de los conocimientos actuales

A. Sola, L. Chow y M. Rogido

Division of Neonatal Perinatal Medicine. Emory University. Atlanta. Estados Unidos.

INTRODUCCIÓN

Los monitores de saturación de oxígeno, u oxímetros de pulso (SpO_2) se introdujeron en la práctica en la década de 1980 no sólo sin efectuar previamente estudios de distribución aleatoria, sino también –lo que es probablemente más importante– sin una educación apropiada de los proveedores de asistencia neonatal en todo el mundo (el personal de enfermería, los terapeutas respiratorios y también los médicos). La educación acerca de algunos conocidos principios fisiológicos, como la relación cambiante entre el oxígeno y la hemoglobina, la presión parcial arterial de oxígeno (PaO_2) y la saturación de oxígeno ($SatO_2$), no cursó paralelamente a la puesta en práctica sistemática de los monitores de SpO_2 .

Los niños pretérmino de cualquier edad gestacional y edad posnatal que reciben oxígeno son tratados en muchos lugares con los mismos objetivos de $SatO_2$ que los que se observan en niños sanos normales que respiran aire ambiente (es decir, los valores “fisiológicos” o “normales”: 96-100%). Esto se aceptó y se puso en práctica en muchos casos sin conocer totalmente cuál es el significado real de la $SatO_2$ y sin considerar la relación cambiante que existe entre la PaO_2 y la $SatO_2$ ni las diferencias existentes entre los monitores de SpO_2 utilizados. En estos últimos años, los hallazgos en diversos estudios han mostrado que los objetivos “fisiológicos” de $SatO_2$, aceptados durante largo tiempo, de hecho pueden ser demasiado elevados. Sin embargo, en la práctica clínica habitual existe una “zona de confort”, y se asume que si la $SatO_2$ es “alta” y el niño tiene un aspecto rosado, el lactante pretérmino “se encuentra bien”. Por otra parte, en muchas unidades, basándose en conceptos conocidos y demostrados, los objetivos de $SatO_2$ no fueron nunca de 97-100% para los niños pretérmino que reci-

ben oxígeno suplementario en las épocas tempranas de la vida.

Los monitores de oximetría son de uso habitual en las unidades de cuidados intensivos desde hace 10-15 años. Se ha afirmado que el oxígeno en sangre puede considerarse ahora como un “quinto signo vital”. En 1989 existían 29 fabricantes que producían 45 modelos diferentes de oxímetros¹. En la actualidad hay menos fabricantes y más de 20 modelos diferentes, pero los avances tecnológicos recientes han modificado algunos aspectos importantes en relación con el funcionalismo de la SpO_2 .

Todos los monitores de SpO_2 presentan una cierta variabilidad entre sus mediciones y con los resultados reales de la $SatO_2$ medida con un cooxímetro; sin embargo, los monitores de SpO_2 de verdadera “última generación” son mucho mejores que el resto. Como hecho importante, los monitores se ven afectados por el ruido, pero los distintos monitores de SpO_2 manejan el ruido de diferentes maneras, lo que provoca divergencias con las mediciones reales e influye asimismo en la rapidez con que se detecta un problema, así como en las alarmas y falsas alarmas y en la presencia o no de “períodos de latencia”. Además, la tecnología más reciente ofrece mediciones del índice de perfusión. Nuestro objetivo consiste en describir todos estos factores y otros, en relación con la monitorización de la SpO_2 en el recién nacido.

La fiabilidad, la exactitud y, por lo tanto, la utilidad clínica de la oximetría de pulso siguen siendo problemáticas en ciertas circunstancias en algunos lactantes. Como se expondrá en este trabajo, el perfeccionamiento de la tecnología del procesado de la señal ha mejorado sustancialmente la capacidad de algunos oxímetros para trabajar de un modo fiable en ciertas situaciones de

Correspondencia: Dr. A. Sola.
Division of Neonatal Perinatal Medicine.
Emory University. 2015 Uppergate Dr. 30322 Atlanta. GA. Estados Unidos.
Correo electrónico: asola2@emory.edu

Recibido en octubre de 2004.

Aceptado para su publicación en diciembre de 2004.

mala perfusión, de artefactos por los movimientos y de ruido originado en otras fuentes, como las luces de fototerapia.

Anteriormente, la enseñanza habitual era que al observar un valor cuestionable de SatO_2 , los clínicos o enfermeras debían estimar la fiabilidad del monitor relacionando la frecuencia cardíaca medida por el oxímetro con la obtenida por el monitor del electrocardiograma (ECG), utilizados simultáneamente. Como veremos más adelante, la exactitud en el registro de la frecuencia cardíaca constituye también un problema en muchos monitores de SpO_2 .

CONOCIMIENTO Y COMPRENSIÓN POR PARTE DE LOS PROVEEDORES DIRECTOS DE CUIDADO INTENSIVO

Lamentablemente, debido a lo incompleto de los programas educativos, no todos los cuidadores son competentes para una interpretación clínica óptima de los datos proporcionados por los monitores de SpO_2 . Según los datos publicados y nuestra propia experiencia, la mayoría de los clínicos creen que han recibido un adiestramiento suficiente sobre este tema. Sin embargo, sólo cerca del 80% son capaces de identificar correctamente lo que mide el oxímetro de pulso. Más preocupante es que sólo el 40-45% de los cuidadores saben cómo funciona un oxímetro de pulso y, lo que es aún peor, sólo el 15-20% poseen un conocimiento correcto de la curva de disociación de la oxihemoglobina, que constituye un concepto clave en la interpretación precisa de los datos proporcionados por estos monitores. Lamentablemente, los monitores de SpO_2 se introdujeron sin llevar a cabo programas educativos adecuados. Ante hipotéticas situaciones clínicas, muchos agentes de salud cometen numerosos errores y valoraciones inadecuadas. Se ha observado que, a pesar de que un gran porcentaje del personal de neonatología se cree bien adiestrado y conocedor de la oximetría de pulso, existe todavía una falta de conocimientos sobre los principios básicos. Por ejemplo, muchos cuidadores de niños pretérmino no tienen claro cuán elevada puede ser la PaO_2 cuando un niño pretérmino (y cualquier persona) respira un gas con suplemento de oxígeno y la cifra de SpO_2 es de 97-100%. De hecho, en esta situación no puede predecirse la PaO_2 , que puede ser "tan baja como" 60-70 mmHg, o "tan alta como" 300 mmHg, o más. Además, actualmente los proveedores de asistencia sanitaria no saben bien cómo funcionan los monitores de SpO_2 , cuáles son las diferencias entre los distintos monitores, y cuáles son las "verdaderas" innovaciones tecnológicas significativas en relación con el procesado de la señal y los sensores "inteligentes".

La distancia existente entre los conocimientos y la práctica se acompaña de morbilidad, que a veces puede ser letal. Nosotros ofrecemos esta revisión con la esperanza

de mejorar el conocimiento de algunos de estos principios, que no sólo tienen consecuencias educativas, sino también un significado clínico relevante.

Las preguntas que trataremos de contestar en esta revisión son:

1. ¿Cómo funcionan los monitores de SpO_2 ?
2. ¿Cómo maneja el ruido y las señales alteradas el monitor de SpO_2 ?
3. ¿La alarma es "verdadera"?
4. ¿El monitor tiene "períodos de latencia" o mantiene valores registrados previamente?
5. ¿El monitor funciona bien y con exactitud cuando más se le necesita?
6. Cuando la lectura de la SatO_2 es superior al 96%, ¿cuál es la PaO_2 en el niño prematuro?
7. Cuando el monitor de SpO_2 lee un determinado nivel de SatO_2 , ¿cuál es la verdadera SaO_2 en el niño prematuro?
8. Cuando el monitor de SpO_2 lee un determinado nivel de SatO_2 , ¿cuál es su variabilidad ("error")?
9. Cuando un monitor lee un determinado nivel de SatO_2 , ¿cuál es la lectura en otro monitor?
10. Finalmente, ¿qué grado de conocimientos tienen los clínicos acerca de las diferencias entre los monitores de SpO_2 , descritas tecnológicamente en muchos estudios clínicos?

Lo que conlleva riesgos puede evitarse mediante la educación y el incremento de los conocimientos de los proveedores de asistencia y cuidados intensivos. Existe cierto acuerdo en que el hallazgo de la "práctica más idónea o perfecta" es a menudo imposible. En cambio, es importante erradicar una malpraxis asociada con mayor riesgo, así como sustituir un monitor con falsas lecturas, falsas alarmas y períodos de "latencia". Ello es factible y, en la práctica clínica, sólo puede ser beneficioso para los recién nacidos.

Nuestro objetivo es revisar detalladamente todas las cuestiones mencionadas en esta introducción y ofrecer respuestas generales a las preguntas antes planteadas, de modo que el lector pueda contestarlas tan objetivamente como sea posible con los conocimientos más actuales.

¿Cómo funcionan los monitores de saturación?

La hemoglobina oxigenada (HbO_2) y la hemoglobina desoxigenada o reducida (Hb) absorben y transmiten determinadas longitudes de onda del espectro luminoso: para la luz roja, en torno a 660 nm, y para la luz infrarroja, en torno a 940 nm. Esto corresponde a una propiedad física peculiar de cada especie molecular, denominada coeficiente de extinción. La física de la oximetría de pulso se ha basado en la ley de Beer-Lambert, en la que intervienen el coeficiente de extinción, la concentración y

la longitud de la vía óptica. Ello se expone en la figura 1, que muestra la relación entre el coeficiente de extinción y la longitud de onda en nanómetros (nm), con detección de la luz roja e infrarroja a 600 y 905-940 nm, respectivamente.

El sensor o sonda del oxímetro de pulso consiste en dos diodos emisores de luz (DEL), uno para la luz roja y otro para la infrarroja, y un fotodiodo detector. Para mejorar el rendimiento, los DEL y el detector deben colocarse en puntos opuestos de un lugar perfundido que sea translúcido. El fotodiodo mide tres niveles lumínicos diferentes: la luz roja, la luz infrarroja y también la luz ambiente.

El principio que permite que el oxímetro transcutáneo sea un oxímetro arterial o "de pulso" es que registra sólo los valores lumínicos transmitidos del volumen adicional de sangre arterial que atraviesa los tejidos con cada pulsación arterial. Sobre la base del trabajo original de Aoyagi, se asumió que *sólo* la sangre arterial pulsa en el lugar de medición, lo que se denomina el componente arterial (CA) pulsátil. La luz absorbida cambia al variar la cantidad de sangre en el lecho tisular y al modificarse las cantidades relativas de HbO₂ y Hb. La medición de los cambios en la absorción de la luz permite estimar la SatO₂ arterial y la frecuencia cardíaca. Además, existe el

componente estático (CE), formado por los tejidos, el hueso, los vasos sanguíneos, los líquidos, la piel y también la intensidad de los DEL, la respuesta del detector y la frecuencia de la sangre venosa, relativamente baja. Si se dividen los componentes pulsátiles (CA) por los componentes no pulsátiles (CE) para cada DEL, se normaliza la transmisión lumínica y no sería necesaria la calibración. Al pasar la luz a través de los tejidos humanos, esta es absorbida en diversos grados.

Así pues, por métodos espectrofotométricos, los monitores de SpO₂ miden la HbO₂ y la Hb, por absorción de la luz roja e infrarroja. Dado que la HbO₂ y la Hb absorben en diferentes cuantías la luz roja y la infrarroja, los oxímetros de dos longitudes de onda no pueden medir las hemoglobinas anómalas (p. ej., carboxihemoglobina [COHb] y metahemoglobina [MetHb]).

Los monitores de SpO₂ detectan las proporciones relativas de HbO₂ y Hb, según el cociente normalizado de luz transmitida, entre la luz roja y la infrarroja, o R/Ir. Ello significa esencialmente que el cociente entre las longitudes de onda de la luz roja e infrarroja (R/Ir) en el fotodetector está relacionado con la SpO₂, como lo muestra la fórmula:

$$\frac{(\text{CA luz roja}/\text{CE luz roja})}{(\text{CA luz infrarroja}/\text{CE luz infrarroja})} = \text{SpO}_2 \text{ arterial}$$

Esta ecuación hace necesario emplear una "tabla de consulta" para computar el cociente R/Ir con la SpO₂. En resumen, todos los valores de R/Ir se relacionan con un valor de SpO₂; por ejemplo, cuando el cociente R/Ir es de 2,50, la SpO₂ es de 0%; cuando el cociente es de 1,50, la SpO₂ es de 40%; y cuando el cociente alcanza 0,40, la SpO₂ es de 100%.

Sin movimiento, los valores de la luz se transmiten a través de la porción constante de la sangre arterial y venosa, y queda descartada la luz que se transmite a través de los tejidos interpuestos (fig. 2A). Sin embargo, *con* movimiento, los oxímetros de pulso convencionales fallan (fig. 2B).

En pocas palabras, la SpO₂ estima el porcentaje de SatO₂ de la sangre arterial pulsátil, al medir la absorción de la luz de dos longitudes de onda y analizar el cociente R/Ir. La calibración del instrumento no es necesaria y la aplicación de los sensores es incruenta y fácil; además, no causan lesiones de importancia, incluso en los recién nacidos de menos peso. Se ha descrito una relación muy significativa de la SpO₂ con la SatO₂ arterial y la PaO₂ dentro de la *gamma normal* de oxigenación de la sangre en individuos sanos, aunque existen diferencias entre los monitores. Algunos de ellos funcionan de forma muy defectuosa en determinadas circunstancias, precisamente cuando son más necesarios.

Para que la medición sea exacta, el monitor debe distinguir entre la absorción constante y los cambios pulsátiles

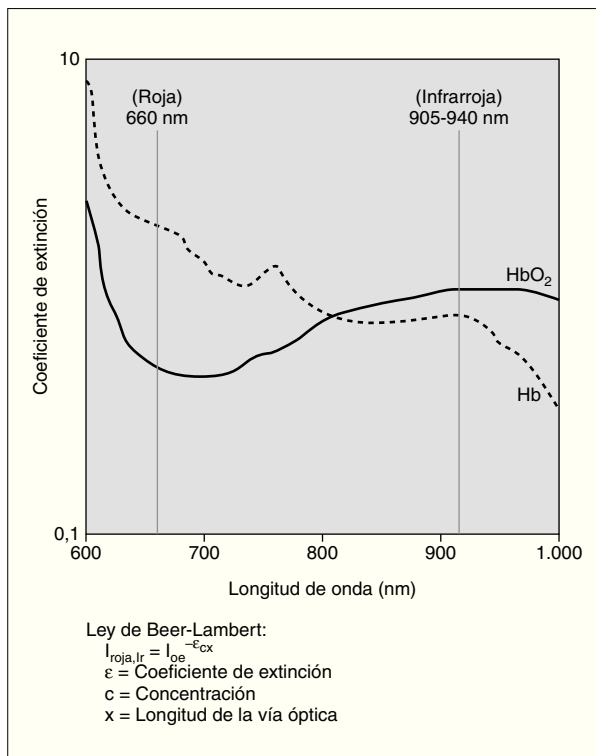


Figura 1. Relación entre el coeficiente de extinción y la longitud de onda, en nanómetros (nm), con detección de la luz roja e infrarroja, a 600 nm y 905-940 nm.

en la absorción producidos por el volumen cambiante de sangre en cada latido cardíaco (fig. 2B). Las falsas lecturas pueden producirse por cambios en la absorción constante o de fondo, al modificarse la morfología o la posición de los tejidos por los que atraviesa la luz. Además, cuando la cuantía del movimiento es mayor de lo que puede reconocerse con la tecnología convencional de la SpO₂, se producen falsas lecturas (fig. 2B).

SATURACIÓN ARTERIAL DE OXÍGENO, CONTENIDO DE OXÍGENO Y OTROS CONCEPTOS BÁSICOS RELACIONADOS CON LOS MONITORES DE SpO₂

La SatO₂ representa simplemente los gramos de hemoglobina [Hb] que son portadores de oxígeno. Si la SatO₂ es del 90 % y la concentración de [Hb] es de 15 g/dl, 13,5 g/dl de Hb están portando O₂, lo que no ocurre con el 1,5 g/dl restante. El aporte y la entrega de O₂ a los tejidos depende de varios factores, no sólo del porcentaje de SatO₂. Entre ellos se encuentra el *contenido* de oxígeno en la sangre. El contenido de oxígeno se expresa en volúmenes por ciento (ml/dl) y depende principalmente del porcentaje de SatO₂, [Hb] y de una constante (% SatO₂ [Hb] 1,36). Con una SatO₂ del 95 % y una [Hb] de 17 g/dl, habrá unos 22 ml/dl de O₂ en la sangre. Si la SatO₂ desciende al 80 %, el contenido de oxígeno en la sangre disminuirá a unos 19 ml/dl. Y si la SatO₂ es del 80 %, pero la [Hb] es de 10 g/dl, el contenido de O₂ en la sangre será sólo de unos 11 ml/dl.

El oxígeno disuelto (es decir, el O₂ no unido a la Hb) es insignificante e influye de un modo mínimo sobre el contenido de O₂, incluso cuando la PaO₂ es muy elevada. Por ejemplo, con una SatO₂ máxima (100 %) y una PaO₂ de 78 mmHg, al aumentar la PaO₂ a 200 mmHg habrá un efecto mínimo sobre el *contenido* y el aporte de oxígeno, pero pueden producirse efectos nocivos a través de

los aniones superóxido y las especies de radicales de oxígeno. La noción esencial es que la PaO₂ es necesaria para ayudar a saturar la Hb, pero permitir que la PaO₂ sea alta no ofrece absolutamente ninguna ventaja, y sí riesgos.

El aporte y la entrega de oxígeno dependen del contenido de O₂ y también del flujo sanguíneo a los tejidos; esto último, a su vez, depende del gasto cardíaco (frecuencia cardíaca y volumen sistólico), la poscarga, el grado de vasoconstricción o vasodilatación regional y otros factores. El concepto fundamental es que con una SatO₂ máxima (100 %) puede haber hipoxia tisular si la [Hb] es baja, el gasto cardíaco disminuye o el flujo local se altera. De modo similar, con una SatO₂ "más baja" puede haber un aporte y una entrega de O₂ suficientes. Sin embargo, si la SpO₂ es inferior al 85 %, ello puede ser una indicación razonable de que el aporte de oxígeno a los tejidos es insuficiente, por los bajos niveles asociados de PaO₂; esto sería aún peor si el *contenido* de O₂ es bajo debido a una cifra baja de [Hb] (7-11 g/dl), lo que ocurre con frecuencia en los niños pretérmino en muchas unidades de cuidados neonatales (UCIN).

La saturación hallada en las determinaciones de gases en sangre arterial (GSA) es una cifra *calculada* y, por lo tanto, no debe considerarse en la práctica clínica. (Por cierto, las muestras capilares ofrecen lecturas más bajas de presión parcial de oxígeno (PO₂) que las arteriales y, por lo tanto, la saturación es siempre más baja que la arterial.) En los aparatos para analizar los GSA existen muchos cambios que no se tienen en cuenta al medir los gases en sangre de un recién nacido, tales como los cambios en pH, temperatura, PaCO₂, 2-3DPG y hemoglobina fetal. En resumen, la SatO₂ informada en el análisis de GSA a menudo no tiene relación con la verdadera SatO₂ arterial.

Se considera que con [Hb] constante y pH y PaCO₂ relativamente constantes, el flujo sanguíneo a los órganos

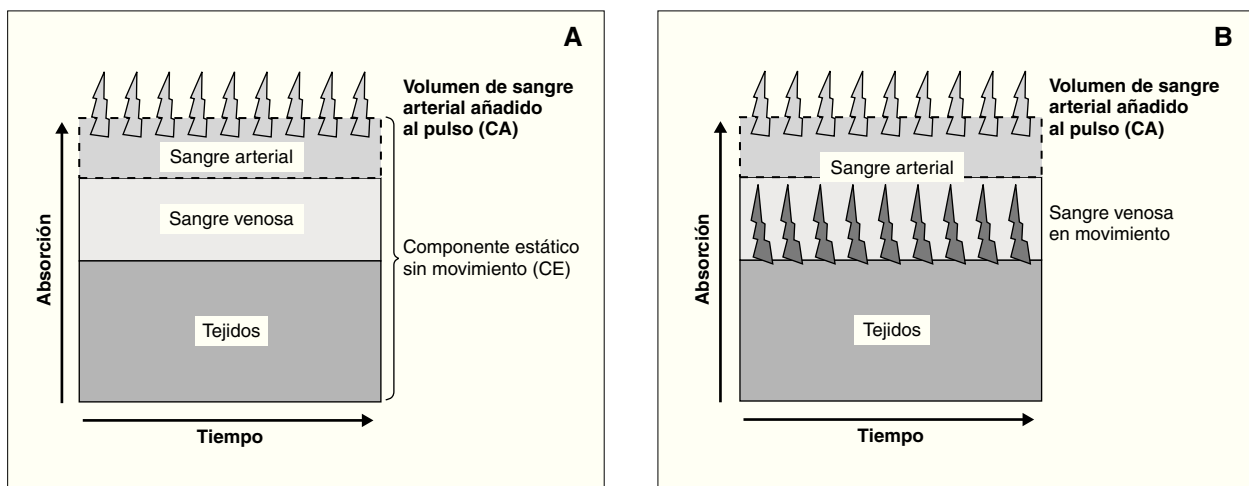


Figura 2. (A) Cuando la luz atraviesa los tejidos, se absorbe una cierta cantidad. Sin movimientos, la única variable de absorción lumínica pertenece a la sangre arterial (CA). (B) Durante el movimiento, la SpO₂ convencional presenta un valor falsamente bajo, dado que mide los componentes pulsátiles arteriales y no arteriales.

vitales (cerebro, corazón y retina) es *inversamente* proporcional a la $SatO_2$, mientras que el flujo sanguíneo a los órganos no vitales (intestino, músculo, pulmón y otros tejidos) está en proporción *directa* con la $SatO_2$. Por lo tanto, la $SatO_2$ puede utilizarse para estimar las tasas relativas de flujo a los órganos y para predecir los cambios en la perfusión de éstos y su capacidad para el metabolismo oxidativo cuando cambia la oxigenación.

En 1986, Severinghaus² emitió la hipótesis de que el monitor de saturación es, en realidad, un medidor de la desaturación; es decir, que desaturación = 100 – saturación. Este autor efectuó recientemente unos comentarios acerca de la discordancia en las posiciones del sensor para las lecturas del monitor y sobre la controversia en torno a las alarmas, los aspectos reguladores de la industria y las transgresiones de patentes. Estos conceptos tienen hoy día más significado que en aquella época.

La monitorización continua de la SpO_2 constituye actualmente un estándar asistencial en las UCIN y ha ejercido una gran influencia sobre el modo como se maneja la oxigenación. Los intervalos de confianza de la SpO_2 en comparación con la $SatO_2$ arterial en una determinada lectura de la SpO_2 pueden ser tan elevados como $\pm 10\%$ cuando la saturación es superior al 70%. Si existe una desaturación importante ($< 70\%$), la precisión es incluso menor. Sin embargo, con las nuevas tecnologías, la precisión es $\pm 3\%$. La precisión global de la SpO_2 está limitada intrínsecamente por el uso exclusivo de dos longitudes de onda, y depende de la población inicial de calibración. De mayor importancia es que los algoritmos empíricos utilizados para detectar la señal en su valor real, el control de calidad del hardware y los avances tec-

nológicos añaden importantes motivos de variabilidad entre los oxímetros, que los clínicos no podemos ignorar.

OXIMETRÍA DE PULSO CONVENCIONAL Y DE NUEVA GENERACIÓN

La premisa clave de la oximetría de pulso convencional era que el único componente pulsátil en movimiento era la sangre arterial (fig. 2A). Esta premisa es errónea, especialmente cuando hay movimiento. Durante el movimiento o “ruido”, la longitud de la óptica se modifica espectacularmente y supera la señal real; por lo tanto, el movimiento constituye una limitación física de la oximetría de pulso. Así pues, sobre la base de conceptos manifiestamente erróneos, la oximetría de pulso convencional da lugar a muchas falsas alarmas. Este tema no se debatió durante más de una década, tras la introducción comercial de los primeros oxímetros de pulso. Lamentablemente, para tratar de solucionar el problema de las falsas alarmas, la industria introdujo otros problemas. Productos como Oxismart “enmascararon” las falsas alarmas cuando el instrumento detectaba movimiento o ruido. Por métodos tecnológicos, la industria añadió el congelamiento, la “latencia” o mantenimiento de lecturas previas y el valor cero, mediante una matriz de decisiones incluida en el equipo. En resumen, en muchos monitores, cuando la longitud de la vía óptica cambia espectacularmente y supera a la señal durante movimientos y “ruido”, la matriz de decisiones ofrece un nuevo valor, un resultado cero o mantiene una cifra correspondiente a un período anterior, lo que produce falsas lecturas, carece de utilidad y es clínicamente peligroso.

Por lo tanto, el problema es que la oximetría de pulso convencional no funciona cuando es más necesaria. Principalmente a causa de artefactos de movimientos y/o mala perfusión, el 50-90% de las alarmas son falsas, y durante más del 10% del tiempo estos monitores no ofrecen una medición constante y adecuada, debido a mala perfusión, movimientos o luz.

Saturación venosa de oxígeno, movimientos y lecturas de la SpO_2

En ausencia de movimientos o de ruido y con una buena perfusión, la $SatO_2$ venosa en el lugar del sensor se halla próxima a la $SatO_2$ arterial. Sin embargo, en situaciones de mala perfusión, la $SatO_2$ venosa puede ser un 70% más baja que la $SatO_2$ arterial. Cuando hay movimientos y mala perfusión, puede comprenderse fácilmente que la señal pulsátil arterial será de baja amplitud, lo que en un momento u otro influirá en la lectura de los monitores de SpO_2 . Además de este fenómeno fácilmente comprensible, la baja perfusión confunde la medición correcta debido a la baja $SatO_2$ venosa que se produce (fig. 3). Cuando la $SatO_2$ venosa periférica es notablemente inferior a la $SatO_2$ arterial en el lugar de la medición, el oxímetro de pulso convencional indica el pro-

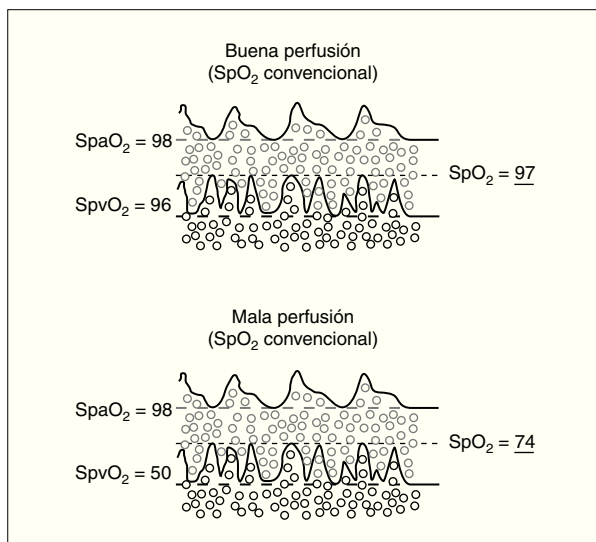


Figura 3. Influencia de la perfusión sobre la exactitud de la oximetría de pulso convencional durante el movimiento. La lectura será falsamente baja cuando la saturación venosa sea también baja.

medio de la SatO₂ arterial y venosa (fig. 3). Además, el “movimiento” es una importante causa de error debido al movimiento de la sangre venosa, que el oxímetro de pulso detecta como si fuera sangre arterial pulsátil (fig. 2B). Durante el movimiento existe una especie de “chapoteo” (con movimiento de vaivén) de la sangre venosa a baja presión. En estas situaciones, el CA es variable debido principalmente al movimiento de la sangre venosa. Dado que la oximetría de pulso convencional mide los componentes pulsátiles arteriales y los no arteriales, el movimiento de la sangre venosa “confunde” al monitor, que ofrecerá niveles de saturación falsamente bajos (figs. 2B y 3).

La frecuencia y la magnitud del error en la medición de la SpO₂ se ven influidos principalmente por: *a)* la saturación de la sangre venosa, que es notablemente inferior a la saturación arterial en las situaciones de bajo flujo; *b)* la magnitud del movimiento y el ruido, y *c)* la amplitud de la señal arterial. En resumen, los monitores de SpO₂ deben funcionar en la UCIN cuando más necesarios son (movimiento, baja SatO₂ venosa, ruido y mala perfusión), pero ello no es así con muchos monitores disponibles en el mercado. Los conceptos fundamentales invocados por la teoría de Masimo SET son: que la luz se absorbe de un modo muy diferente cuando hay movimiento, y que las mediciones con baja amplitud de la señal arterial son posibles con una tecnología adecuada.

Saturación funcional y fraccional

Se han descrito dos tipos diferentes de saturación: funcional y fraccional. Estos conceptos, aunque teóricos, pueden tener importancia en presencia de una dishemoglobinemia. La saturación *funcional* es la cantidad de HbO₂ expresada en forma del porcentaje de hemoglobina que *puede* transportar oxígeno. Por otra parte, la saturación *fraccional* es la HbO₂ expresada en forma del porcentaje de *toda* la hemoglobina medida (incluidas la COHb y la MetHb). Por lo tanto, la saturación *funcional* es:

$$\frac{\text{Saturación fraccional}}{100 - (\% \text{ COHb} + \% \text{ MetHb})} \times 100 = \text{Saturación funcional}$$

Como ejemplo para aclarar los conceptos anteriores, supongamos el caso de un niño con una [Hb] total de 14 g/dl. Supongamos asimismo que 7 g/dl son de COHb o MetHb, y los otros 7 g/dl *pueden* transportar oxígeno, en este ejemplo extremo. Si se realiza una determinación de la saturación funcional y si los gramos de hemoglobina (7 g/dl) que pueden transportar oxígeno están totalmente saturados, la lectura de la saturación sería del 100%. Sin embargo, si se mide la saturación fraccional (y 7 g/dl de los 14 g/dl estuvieran también totalmente saturados), la lectura sería del 50%. Independientemente de

que los fabricantes utilicen la saturación funcional o fraccional para calibrar sus oxímetros, se recomienda la valoración mediante la saturación fraccional, dado que es una variable clínicamente relevante. No existe una referencia absolutamente exacta de la SatO₂, aunque se aceptan como referencia válida los oxímetros *in vitro* con múltiples longitudes de onda (cooxímetro).

Cuestiones clínicas relacionadas con los monitores de SpO₂

Clínicamente es necesario recordar que en la asistencia neonatal se utilizan muchos fármacos que pueden modificar la perfusión, como sedantes, anestésicos, dopamina y otros. También es importante tener en cuenta que las señales de SpO₂, poco fiables durante la hipoxemia y la hipotensión, no pueden mejorarse con dosis elevadas de dopamina o con una enérgica expansión del volumen sanguíneo. Es necesario utilizar monitores de tecnología adecuada, fiables y precisos, de modo que los movimientos y los cambios de temperatura y de luz no afecten a las lecturas correctas de la SatO₂.

Pigmentación

La pigmentación intensa de la piel puede alterar los valores de la SpO₂. Se ha estimado que el grado de pigmentación en el recién nacido, especialmente en el pretérmino, no es suficiente para ocasionar este problema. Además, con la nueva tecnología de la oximetría de pulso, la ictericia producida por elevación de los niveles plasmáticos de bilirrubina no interfiere en la determinación de la SpO₂ en el recién nacido.

Luz ambiental

La fototerapia puede interferir en la exactitud de la SpO₂, del mismo modo que otras fuentes de luz ambiental intensa. Este problema se ha mejorado notablemente con las nuevas tecnologías, como se describe en esta revisión.

Tipos de hemoglobina

Carboxihemoglobina (COHb). Puede elevar falsamente los valores de la SpO₂ (es decir, SpO₂ > SaO₂ real), debido a que la COHb absorbe la luz en las dos longitudes de onda que se utilizan en la oximetría de pulso, en un grado similar al de la HbO₂. Este problema es más común en los fumadores, pero un neonato cuya madre fume intensamente puede presentar concentraciones de COHb relativamente elevadas durante el período posnatal inmediato.

Metahemoglobina (MetHb). Esta especie tiene un característico color pardo que da lugar a lecturas cercanas al 85% en los oxímetros de pulso. Sin embargo, la MetHb constituye menos del 1% de la concentración total de hemoglobina, y no da lugar a problemas impor-

tantes en la mayoría de los casos clínicos. Sin embargo, algunos fármacos como las sulfamidas, ciertos anestésicos locales y el óxido nítrico, así como los hemoderivados artificiales, pueden generar niveles peligrosos de MetHb. En estos casos hay cifras bajas de SpO₂, contenido de oxígeno y entrega de oxígeno, pero la PaO₂ suele ser normal o elevada.

Hemoglobina fetal (HbF). La existencia de una gran proporción de HbF puede disminuir erróneamente la SatO₂ arterial cuando se mide con un cooxímetro, debido a que incrementa falsamente la medición de COHb, lo que reduce, también falsamente, el porcentaje medido de HbO₂. Sin embargo, la HbF no posee un coeficiente de extinción que difiera lo suficiente del de la Hb o la HbO₂ como para influir de un modo cuantificable en los valores de SpO₂. En el período posnatal inmediato existe una elevada concentración de HbF, y ésta posee una curva de SatO₂ desviada hacia la izquierda y una relación diferente con los valores de PaO₂. Por este motivo, la HbF alcanza niveles de SatO₂ cercanos al máximo con valores de PaO₂ relativamente bajos. Una SatO₂ "clínicamente aceptable" (de 86 a 93%) puede asociarse en algunos casos con niveles de PaO₂ tan bajos como entre 38 y 42 mmHg, pero en este caso el contenido y la entrega de oxígeno pueden ser perfectamente suficientes. Además, el neonato con concentraciones elevadas de HbF puede presentar saturación completa (SpO₂ "en los límites altos de la normalidad", es decir, > 95%) con niveles de PaO₂ más bajos que cuando disminuye la concentración de HbF en el período posnatal.

Altas y bajas concentraciones de oxígeno

En algunos casos, cuando la SatO₂ es inferior al 85%, la SpO₂ medida es el 5-10% más elevada que la SatO₂ real. Diversos factores pueden contribuir a ello. Dado que la posición del sensor tiene una importancia crítica para lograr lecturas correctas de SpO₂, su posicionamiento defectuoso puede dar lugar a que el monitor de SpO₂ indique sólo una leve hipoxemia, cuando en realidad ésta es intensa. Recientemente, Gerstmann et al³ han confirmado un hecho importante. Estos autores mostraron que los oxímetros de pulso convencionales ofrecen resultados más bajos que los reales cuando la saturación es alta, y unos resultados más elevados que los reales cuando la saturación es baja³. Este es uno de los motivos por los cuales muchos monitores de SpO₂ pueden leer 97-98%, cuando la verdadera saturación arterial de oxígeno medida por cooximetría es del 100%. Además, en una valoración clínica reciente realizada en niños, Robertson y Hoffman⁴ mostraron que con baja calidad de la señal o durante la hipoxemia, los nuevos monitores no son clínicamente equivalentes entre sí. En este estudio, el monitor Masimo SET ofreció menos datos cuestionables que el monitor Nellcor⁴.

Movimientos

Una importante limitación de la oximetría de pulso convencional han sido los artefactos producidos por los movimientos. Como se ha mencionado, el error inducido por los movimientos puede conducir a un ajuste excesivo e innecesario del oxígeno inspirado. Los movimientos añaden pulsatilidad a los componentes sanguíneos no arteriales. La magnitud del error en la medición de la SpO₂ está influida por la SatO₂ venosa, que disminuye en las situaciones de bajo flujo, así como por la magnitud de los movimientos, la amplitud de la señal arterial y los algoritmos técnicos de cada monitor de SpO₂. La tecnología SET ha ayudado a perfeccionar los diagnósticos y a minimizar las intervenciones innecesarias en esas circunstancias (v. más adelante).

Baja presión diferencial

En las situaciones con perfusión muy escasa, es posible que no se genere una presión diferencial lo suficientemente amplia como para determinar la SpO₂ de un modo fidedigno. La perfusión del lecho vascular entre el diodo emisor de luz (DEL) y el sensor de la sonda del monitor determina la magnitud de la señal disponible para el oxímetro de pulso. Al disminuir la perfusión, también lo hace la magnitud de la señal. Cuando la perfusión desciende hasta niveles demasiado bajos, la magnitud de la señal se aproxima al nivel de ruido básico del sistema en la electrónica del SpO₂, lo que permite que el ruido supere a la señal fisiológica. Esta situación puede darse en los niños con insuficiencia cardíaca, con o sin shock, y también en aquellos que han recibido un gran volumen de transfusiones y tienen una presión venosa elevada. La dopamina puede inducir asimismo una pérdida similar de la presión diferencial, al ocasionar vasoconstricción que se asocia con pulsación venosa inversa. Estas situaciones producen una señal de pulso sobreañadida y son el motivo por el cual muchos monitores de SpO₂ del mercado estiman falsamente la SatO₂ en las circunstancias mencionadas.

Temperatura

La temperatura periférica baja, con vasoconstricción inducida, contribuye también a la inexactitud de los valores de la SpO₂.

Efecto de la altitud

Thilo et al⁵ estudiaron el efecto de la altitud sobre las lecturas de la SpO₂. En los niños sanos, de hasta 3 meses de edad y a la altitud de Denver, Colorado, a 1.610 m sobre el nivel del mar, la SpO₂ media era de 92-93%. El límite inferior de referencia era de 86% durante el sueño tranquilo. Niermeyer et al⁶ estudiaron mediciones en serie de la SpO₂ desde el nacimiento hasta los 4 meses, en niños sanos y a una altitud elevada de 3.100 m. La SpO₂ osciló entre 81 ± 5% y 91 ± 2% durante los primeros 4 meses de vida.

Empleo de la monitorización de la SpO₂ en la sala de partos

La situación de la frecuencia cardíaca y de la oxigenación es esencial para valorar a los recién nacidos en la sala de partos. La nueva generación de oxímetros de pulso, particularmente Masimo SET, se ha valorado para su uso en la sala de partos en el tratamiento de los recién nacidos de alto riesgo⁷. Los hallazgos revelaron una diferencia significativa de eficacia con esta nueva tecnología SET y también mostraron una mejor evolución de los pacientes, en comparación con el grupo en que no se monitorizó la SpO₂. Esta tecnología proporciona un conocimiento rápido y una presentación casi continua de los valores de SpO₂ en la sala de partos. Esto puede ser muy beneficioso para la asistencia respiratoria inicial, así como para tomar decisiones sobre administración y dosificación del oxígeno y necesidad de emplear procedimientos más enérgicos. Por lo tanto, la monitorización posnatal inmediata, o casi inmediata, de la SpO₂ del recién nacido en la sala de partos es ahora posible y valiosa.

Hipoxemia inaparente cercana al momento del alta de la UCIN

Algunos clínicos prolongan la hospitalización a causa de lecturas "bajas" de SpO₂. Ciertos niños que aparentemente se hallan listos para recibir el alta, sin signos físicos de dificultad respiratoria, presentan lecturas marginalmente reducidas de SpO₂, lo que puede retrasar el alta. De hecho, estas lecturas de la SpO₂ pueden ser falsas, pero a veces resulta difícil para el clínico saberlo con exactitud, sobre todo cuando no se dispone de análisis de GSA. El uso de SpO₂ puede revelar una hipoxemia subclínica, que habitualmente se autocorrigue, y que de otro modo pasaría desapercibida para el clínico. La incidencia de esta hipoxemia clínicamente inaparente oscila desde el 20 y el 82%⁸. Parte de esta variación se debe a las diferentes definiciones sobre la magnitud y la duración de los episodios capaces de producir desaturación. La cuestión no resuelta es la de saber si estos períodos de hipoxemia, hasta ahora desconocidos, deben tratarse o no; y si el tratarlos sirve para establecer alguna diferencia⁸.

Documentación de las saturaciones de oxígeno bajas y altas en la práctica clínica

Otro problema clínico no resuelto es el registro de las SpO₂ en las notas de enfermería y del médico. Algunos datos⁹ sugieren que, de entre todos los episodios de desaturación demostrados por oximetría de pulso, sólo el 33% se ponen de manifiesto en las notas de enfermería, y únicamente el 7% en la hoja de evolución cumplimentada por el médico. Además, los períodos de hipoxemia real y grave tienden a documentarse con más frecuencia que los períodos de SpO₂ elevada, en particular después de haber aumentado la fracción inspiratoria de oxígeno

(FiO₂) a causa de un "episodio de desaturación". Esta práctica debe modificarse si se pretende mejorar los resultados neonatales.

Alarmas en las UCIN

Se ha afirmado que hasta el 86% de las alarmas en una UCIN son falsas. La SpO₂ es particularmente proclive a estas alarmas, sobre todo en la asistencia neonatal. Bohnhorst et al¹⁰ lograron una sensibilidad del 93-95% para evitar una PaO₂ superior a 80 mmHg al colocar el límite superior de la alarma del monitor de SpO₂ en el 95%. Lamentablemente, estos autores observaron que dicha elevada sensibilidad se acompañaba de una baja especificidad (26-45%), lo cual indica que las probabilidades de que una alarma por hiperoxemia fuera falsa era del 55-74%.

El ajuste del límite superior de las alarmas lo efectúa siempre el personal sanitario tratando de minimizar el número de alarmas, falsas o reales. Ello crea un importante problema, ya que también se desconectan las alarmas. Este problema es mucho peor cuando no se utiliza una tecnología avanzada como la descrita en esta revisión. En un informe de Salyer¹¹, cuando los límites de las alarmas tienen una probabilidad del 80-90% de identificar períodos de hiperoxemia con los oxímetros antiguos, el personal enfrenta una situación difícil, debido a que la alarma suena con demasiada frecuencia. Muchos clínicos han quedado algo hastiados por la frecuencia con que deben responder a las alarmas. En muchos lugares se hacía caso omiso (y todavía se hace) de la alarma, dada la cantidad de falsas alarmas. Las alarmas se han convertido en una molestia de la oximetría de pulso en la asistencia neonatal, y este es uno de los motivos por los cuales con mucha frecuencia se desconectan. Naturalmente, esto se ha acompañado de consecuencias graves. La Joint Commission on Accreditation of Healthcare Organizations (JCAHO) publicó en febrero de 2002 un boletín especial de fenómenos relacionados con las alarmas, debido su manejo inadecuado por parte de los proveedores sanitarios. En la actualidad ha aumentado considerablemente el optimismo, debido a que la nueva tecnología de SpO₂ ofrece más confianza a los proveedores sanitarios al crear menos falsas alarmas y medir la SatO₂ con mucha más exactitud.

Poets et al¹² estudiaron la frecuencia de las alarmas en la oximetría de pulso. Compararon Masimo SET con un oxímetro convencional en niños pretérmino no sedados. La frecuencia mediana de alarmas por hora fue de 4,0 con la SpO₂ convencional, y de 0,3 con Masimo SET. Nosotros hemos observado un notable descenso de las alarmas y un manejo significativamente más adecuado por parte del personal de enfermería al cambiar a Masimo SET¹³. Es de interés señalar que los ruidos ambientales tienen un impacto sobre el desarrollo de los recién nacidos. Por lo tanto, el disponer de oxímetros de pulso que

no generen falsas alarmas puede tener un efecto secundario positivo.

Dado que es imposible mantener niveles "perfectamente estables" de SpO₂ y oxígeno en la sangre, debe buscarse mantener la SpO₂ dentro de un rango de valores que disminuyan las alarmas y la hiperoxia. Al mismo tiempo, se deben evitar los cambios drásticos de FiO₂ y responder a las falsas alarmas.

Educación y "cambio de cultura"

Una pregunta importante no contestada es el motivo por el cual se inició la oximetría de pulso en la UCIN sin un adiestramiento y una educación suficientes sobre cómo interpretar las lecturas, el modo de reaccionar ante los datos del monitor y qué diferencias tecnológicas existen entre los distintos monitores.

Un concepto fundamental es que la SpO₂ se diseñó para medir la hipoxia y no tiene valor para medir la hiperoxia. Sin embargo, los neonatólogos deben saber también si existe hiperoxia, especialmente en el caso de los prematuros. Así pues, es necesario que los oxímetros se utilicen con pleno conocimiento de la fisiología y la tecnología. El mayor problema es que la oximetría de pulso se utiliza como sustituto de la tensión de oxígeno arterial, pero cuando la SatO₂ es igual o superior al 96% se pierde la fiabilidad de saber cuál es la verdadera PaO₂, y ello puede convertirse en un problema importante en relación con la toxicidad del oxígeno, en particular en los niños muy prematuros. Sin embargo, no es fácil la tarea de cambiar la cultura de tal modo que no se acepten cifras altas de SpO₂, como hemos descrito en nuestros trabajos anteriores^{13,14}. Todos nosotros (técnicos, enfermeras, neonatólogos y médicos en general) debemos tratar de comprender mejor la oximetría de pulso y reaccionar adecuadamente ante las alarmas.

RELACIÓN ENTRE LA PAO₂ Y LA SATURACIÓN DE OXÍGENO

La relación entre la PaO₂ y la SatO₂ se conoce desde hace muchos años. Aunque no ha habido nunca datos convincentes para el uso racional del oxígeno en la asistencia de los niños pretérmino, existe una clara evidencia fisiológica de la relación entre el oxígeno y la hemoglobina. Cuando un niño respira oxígeno suplementario, como tantos en la UCIN, debemos preguntarnos: ¿cuál es la PaO₂ cuando la SpO₂ es de 80, 90 o 100%, o cercana a estas cifras? En la figura 4 se expone un resumen de esta relación. No sabemos con exactitud cuál es la PaO₂ en ciertos niveles de SaO₂ en el recién nacido. Como puede verse, dentro de unos límites de SatO₂ de 83-93%, la PaO₂ se encontrará aproximadamente entre 43 y 60 mmHg en la mayoría de los casos. Sin embargo, debemos recordar y aceptar humildemente que cuando un niño respira oxígeno suplementario somos incapaces de

predecir la PaO₂ cuando la SatO₂ en los monitores de SpO₂ es superior al 95%. Sin embargo, a niveles "medios y bajos" de SpO₂ pueden predecirse bastante bien los límites de la PaO₂. Cuando las lecturas de la SpO₂ son de 90-93%, en la mayoría de los niños la PaO₂ oscila entre 45 y 55 mmHg y no es probable que supere los 65-70 mmHg.

Cuando un niño con pulmones normales respira oxígeno suplementario (FiO₂ de 0,22-1,0), si en el monitor de SpO₂ se lee 97-100%, la PaO₂ puede ser elevada, de 100 a 300-500 mmHg. Por otra parte, con una FiO₂ de 1,0 en niños con cardiopatías congénitas, hipertensión pulmonar persistente o pulmones gravemente anormales, la SpO₂ puede ser baja (70-85%), pero también puede ser de 93-95%, y la PaO₂ estar en torno a 60-70 mmHg.

En resumen, las mediciones de SpO₂ por debajo de 80% y por encima de 95% no predicen la PaO₂ de un modo fidedigno y exacto. Como proveedores de asistencia neonatal, debemos recordar que además de la inexactitud de la SpO₂, que tiene errores entre 0,07 hasta incluso 5% a SatO₂ de 85 a 100%, los monitores de SpO₂ no permiten estimar la PaO₂ con exactitud cuando las saturaciones son superiores al 95% en niños que respiran oxígeno. En este nivel de saturación, pequeños cambios en la SpO₂ (de 1 a 2%) pueden asociarse con cambios relativamente grandes de la PaO₂.

Límites normales y anormales de oxígeno, saturación de oxígeno y PaO₂

En la actualidad no existen pruebas definitivas ni consenso, y por lo tanto se carece de un acuerdo final acerca de cuál es la saturación óptima ideal para el recién nacido pretérmino. Todavía queda por definir cuáles son los límites "normales" y aceptables de saturación en el recién nacido durante una enfermedad aguda. Sin embargo, en nuestra calidad de clínicos, continuamente debemos tomar decisiones a este respecto. Las concentraciones elevadas de SpO₂ en los niños pretérmino que se tratan con oxígeno son innecesarios, y posiblemente perjudiciales. Es necesario que respondamos a ello enérgicamente, del mismo modo como lo hacemos frente a los valores de SpO₂ hipóxicos, y tratemos de evitar tanto la hipoxia como la hiperoxia. Como hemos descrito en otro trabajo¹⁴, nuestras recomendaciones actuales para ello son: *a)* utilizar la nueva tecnología Masimo SET desde el momento del nacimiento, para evitar falsas alarmas y respuestas clínicas innecesarias e inadecuadas; *b)* desde el nacimiento y durante las primeras semanas de vida, mantener niveles de SpO₂ que no superen el 93% o un máximo de 95% en los niños prematuros que respiran oxígeno; *c)* establecer los límites de la alarma superior en dichos valores, y *d)* no desconectar las alarmas. El nivel inferior en que deben fijarse los límites de las alarmas es todavía cuestionable en estos momentos, y debemos subrayar la advertencia de que el número que

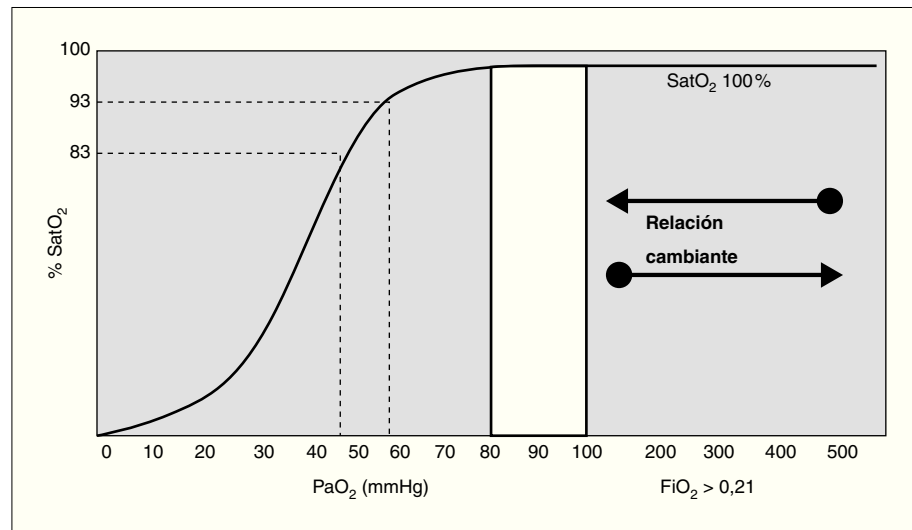


Figura 4. $SatO_2$ y PaO_2 (curva de disociación del oxígeno). Dentro de una gama de saturaciones de 83-93 %, la PaO_2 será aproximadamente de 43 a 60 mmHg.

muestran los monitores de SpO_2 es solamente un número. La cuestión de definir el “valor bajo exacto de la SpO_2 ” que debe aceptarse se complica por el hecho de que los diferentes monitores exhiben lecturas distintas de la SpO_2 en las mismas condiciones y en el mismo niño. Así pues, cuando en un monitor se lee 85 %, otro monitor en el mismo niño puede mostrar lecturas de un 83 u 87-88 %. Además, la verdadera $SatO_2$ arterial puede ser diferente de la lectura del monitor, en particular cuando se emplea una tecnología inadecuada. Tras estas advertencias, una cifra aceptable para el límite inferior de las alarmas podría ser la de 85-87 %, para evitar fenómenos hipóxicos y lograr una entrega suficiente de oxígeno. Como clínicos, hemos de elegir un rango de valores de SpO_2 aceptando la incertidumbre actual, con el objetivo de evitar la hipoxia y la hiperoxia, los cambios drásticos de FiO_2 y PaO_2 que provocan amplias fluctuaciones en la oxigenación, las alarmas innecesarias y las respuestas a las falsas alarmas.

Existe controversia en torno a los riesgos o beneficios, reales o potenciales, de los valores moderadamente “bajos” de PaO_2 . La mayoría de los clínicos aceptan una gama de PaO_2 en los niños pretérmino entre 45 y 70-75 mmHg. Sin embargo, no se han realizado determinaciones sistemáticas rigurosas, mediante trabajos de investigación cuidadosamente controlados, para definir cuáles son los niveles de PaO_2 y/o SpO_2 inocuos o perjudiciales, y en qué circunstancias y para qué niños son aplicables estos valores. Sin embargo, se asume que valores de PaO_2 inferiores a 45 mmHg se asocian directamente con vasoconstricción de los vasos pulmonares y vasodilatación del conducto arterioso. Si esto se prolonga, habrá elevación de la presión arterial pulmonar, reducción del flujo sanguíneo pulmonar, cortocircuito de derecha a izquierda y, posteriormente, hipoxia y acidosis sistémicas. Los valores de PaO_2 elevados (> 85-90 mmHg) pueden provocar un aumento de las especies de radicales de oxígeno y

asociarse con lesiones vasculares retinianas¹⁴ y también con lesiones en otros órganos, incluido el cerebro¹⁵⁻¹⁷. Se asume que los valores “bajos” de SpO_2 (< 80 %) y los “elevados” (≥ 96 %) son perjudiciales; las cifras elevadas son más perjudiciales en el niño pretérmino que en el niño a término. Por lo tanto, deben evitarse los valores elevados de $SatO_2$ en los niños pretérmino que respiran oxígeno suplementario.

Con una monitorización precisa y en condiciones clínicas bien controladas, la saturación que permitiría alcanzar y mantener una oxigenación sanguínea “normal” en el niño a término que respira oxígeno suplementario puede ser del 93 al 97 %. Con aire ambiente, un niño a término con una SpO_2 de 90-92 % puede hallarse hipóxico. Esto debe documentarse, y puede ser necesario administrar oxígeno suplementario si existe hipoxemia (baja PaO_2). En el niño pretérmino, el rango “aceptable” puede hallarse entre el 88 y el 93 %; sin embargo, para no aumentar y disminuir de modo importante la FiO_2 en estos niños pretérmino, es posible que deba ampliarse dicho rango. Por ejemplo, 85-88 % en los límites bajos, y 93-95 % en los límites altos. Sin embargo, las circunstancias cambian notablemente en el recién nacido, y el “rango aceptable” de saturaciones quizá deba expandirse tempranamente en el curso neonatal en diferentes circunstancias clínicas, siempre evitando las saturaciones de oxígeno elevadas (hiperoxia) y la hipoxia. Todas estas cuestiones requieren la realización de estudios para mejorar la asistencia clínica.

Tecnología de extracción de la señal. Paradigma fisiológico

Gran parte de los problemas derivados del uso clínico de la SpO_2 en el recién nacido, especialmente los artefactos por movimientos, ruido y mala perfusión, actualmente se han resuelto o han mejorado notablemente con el *software* de la oximetría de pulso de nueva genera-

ción y la tecnología de extracción de la señal (*signal extraction technology*, SET). La tecnología Masimo SET ha mejorado en 10 veces el umbral de medición en condiciones de mala perfusión, a 0,02% Ir CA/Ir CE, y fue la primera en obtener la acreditación de la Food and Drug Administration (FDA) por su exactitud durante los movimientos y la mala perfusión. Otros fabricantes han seguido este camino con la tecnología de nueva generación.

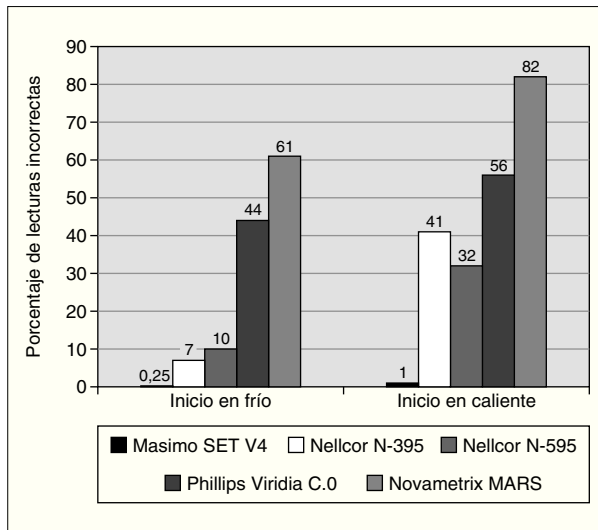


Figura 5. "APOD" es un detector inteligente que ayuda también a disminuir muy significativamente el porcentaje de lecturas incorrectas, como puede observarse.

Sin embargo, Masimo SET V4.3 sigue siendo todavía el mejor oxímetro de pulso, según se ha valorado y descrito en la literatura.

La SET está constituida por una serie de algoritmos, con diseños de *hardware*, del sensor y de los cables para el paciente, que en conjunto permiten una monitorización precisa de la $SatO_2$ y de la frecuencia cardíaca durante los movimientos y la mala perfusión. Lo más fascinante son los algoritmos que utiliza. El algoritmo Masimo SET utiliza cinco métodos alternativos para calcular la SpO_2 , cada uno de ellos con sus propios puntos fuertes y débiles. Según el modelo de señal de cada algoritmo, un dispositivo mediador decide si todos, alguno o ninguno de estos métodos son fiables para la determinación final de la SpO_2 .

El algoritmo más potente de Masimo SET es el denominado de transformación discreta (o "aislada") de la saturación (del inglés: *discrete saturation transform* o DST). Se basa en principios fisiológicos exactos, entre ellos que el grado de perfusión determina el grado de cortocircuito arteriovenoso. Durante los movimientos, la sangre venosa es el principal factor que contribuye al ruido, como se ha descrito anteriormente. Si se aísla el componente venoso de este ruido, los filtros adaptativos pueden anular muy eficazmente este componente del ruido. El DST actúa por barrido de todos los posibles valores de los cocientes lumínicos R/Ir (es decir una SpO_2 de 1-100%), caracteriza el ruido para cada posible cociente R/Ir y mide la potencia de salida del filtro adaptativo para cada posible cociente. El DST crea una apariencia estéreo para el oxígeno tisular: el lado izquierdo para la sangre veno-

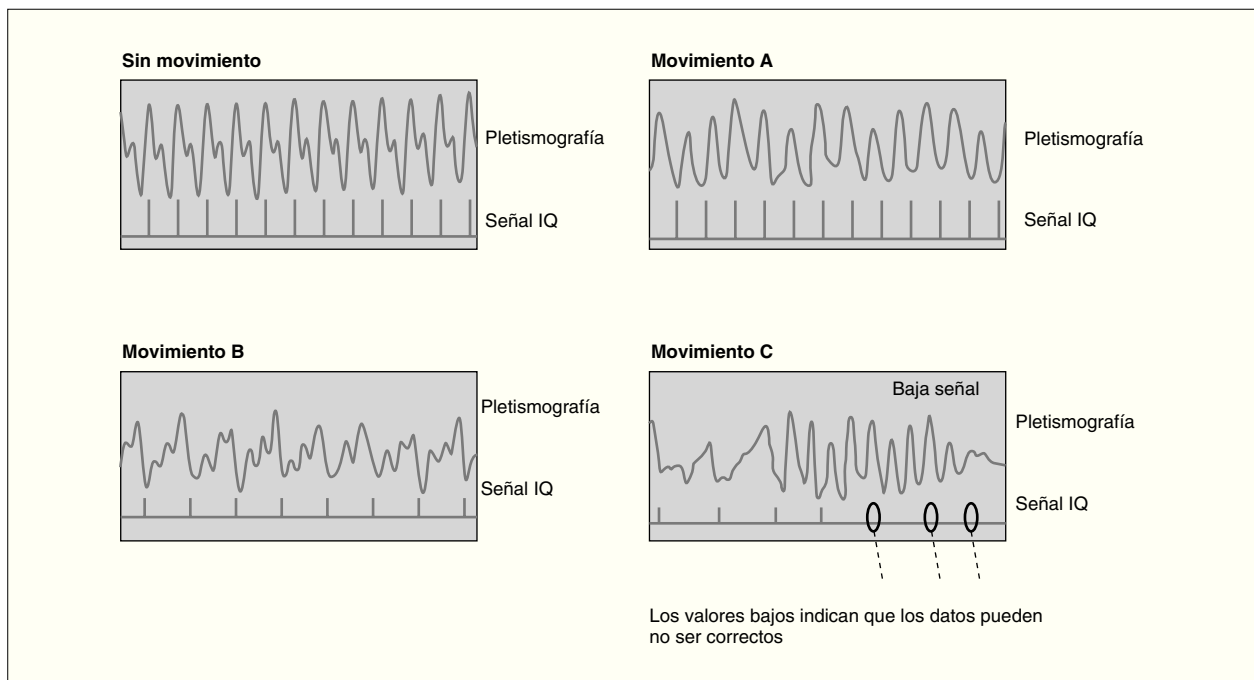


Figura 6. Señal IQ que comprueba permanentemente la calidad de la señal (v. texto). Los valores bajos indican que los datos pueden no ser correctos.

sa; el derecho, para la arterial. Mediante un generador de la señal de referencia, basado en el *software*, se aíslan el ruido o la señal de las fuentes roja e infrarroja, y mediante un filtro adaptativo se aíslan el pletismógrafo o el ruido venoso, se mide su energía y se representa gráficamente una potencia para cada saturación posible (1 a 100%). El DST elabora una sola presunción, muy importante: que la sangre arterial es más oxigenada que la venosa. Por lo tanto, se determina que el pico de potencia asociado con la SatO_2 más elevada corresponde a la SatO_2 arterial. Éste es el algoritmo más potente en la oximetría de pulso, debido a su presunción limitada y fisiológicamente bien fundada. Con DST, los oxímetros de pulso Masimo SET pueden determinar con precisión la SatO_2 , tanto si el movimiento es periódico, aleatorio o impulsivo. Puede incluso determinar con exactitud la SatO_2 y la frecuencia cardíaca si el movimiento comienza antes y persiste después de conectar el monitor.

Origen del ruido

Los artefactos por movimientos se deben a seis causas principales, que se enumeran a continuación por orden de mayor a menor importancia:

1. Movimiento de la sangre venosa.
2. Movimiento del sensor y desconexión.
3. Ruido por la luz que emiten los DEL y llega al detector sin pasar a través del lugar de medición.
4. Ruido debido al cable que se mueve y se dobla, conocido como ruido triboeléctrico.
5. Movimiento de la sangre tisular y capilar.
6. Movimiento de la sangre arterial.

Cuando el paciente se mueve, los ítems 1-6 anteriores tienen la misma frecuencia (frecuencia de los movimientos del paciente). Un concepto fundamental es que el DST mide el ruido y no lo supone o "adivina". El algoritmo y el *hardware* SET eliminan todos los ruidos antes mencionados.

OTROS HALLAZGOS IMPORTANTES EN LA TECNOLOGÍA DE LA SpO_2

Otros diversos factores han ayudado también a revolucionar las innovaciones en la oximetría de pulso. Entre ellos se encuentra *FastSat* (o *SatRápida*), una tecnología que detecta con alta fidelidad los cambios rápidos en la SatO_2 arterial y puede seguir inmediatamente y con precisión los descensos rápidos de la saturación, en comparación con otros monitores. Lo mismo sucede con la monitorización de la frecuencia cardíaca.

La sonda adaptada para la detección (registrada como *adaptive probe of detection*, APOD) es también un algoritmo "inteligente" que ayuda a reducir de un modo muy importante el porcentaje de lecturas incorrectas, como se muestra en la figura 5. En la figura se observa que algunos

monitores proporcionan lecturas incorrectas en cerca del 60-80% de las ocasiones, en comparación con Masimo SET con "APOD", que sólo proporciona 0,25 hasta un máximo de 1% de lecturas incorrectas con el comienzo en caliente, cuando la sonda se ha desprendido del paciente. El monitor Masimo SET puede colocarse también en "sensibilidad máxima" cuando la perfusión es muy baja y el clínico desea ver lo que ocurre, sin estar preocupado de que la sonda pueda desprenderse del paciente.

Otra innovación de Masimo es la Signal IQ, que comprueba permanentemente la calidad de la señal, lo que ofrece al especialista la posibilidad de saber cuándo debe cuestionar la medición que se muestra. Esto se resume en la figura 6, donde el primer recuadro muestra la lectura cuando no existe absolutamente ningún movimiento. Nótese que el pico de la Signal IQ es alto y señala el momento de cada pulsación. En el Box A existe algo de movimiento, pero la Signal IQ es todavía muy adecuada, las barras son todavía elevadas y se indica el momento de la pulsación. En el Box B con movimiento, la Signal IQ está algo disminuida, pero la lectura sigue siendo precisa. Finalmente, en el Box C con movimiento, los picos de la Signal IQ se hallan casi ausentes. Ello alerta al clínico sobre la posible alteración de los datos de SpO_2 , y lo capacita para no aumentar ni ajustar la FiO_2 basándose en premisas falsas.

A través de las innovaciones en biofísica y tecnología, se han añadido otros muchos avances a este monitor. Uno de ellos es *Clear Vue*, que esencialmente permite al clínico *ver con claridad*. Otro es *SmartTone*, que suena en sincronía con el pulso, incluso durante los movimientos. Otro es *Diagnostic Pleth*, que exhibe la verdadera pletismografía, mientras que los otros oxímetros de pulso distorsionan la morfología pletismográfica. Otro avance significativo es el índice de perfusión (o *perfusion index*). Indica la potencia de la señal del pulso arterial y puede ser de gran valor para diagnosticar los problemas y la gravedad de la enfermedad, incluso cuando las lecturas de la SatO_2 se mantienen con precisión.

A través de todos los avances indicados, se ha demostrado que el monitor Masimo SET SpO_2 tiene la mayor sensibilidad y especificidad, en comparación con cualquier otro oxímetro de pulso del mercado mundial, como mostraremos más adelante en los estudios comparativos.

NUEVA TECNOLOGÍA DE SENSORES UTILIZADA EN LA OXIMETRÍA DE PULSO

Otra importante invención de Kiani et al en Masimo Corporation son los sensores denominados sondas ópticas de bajo ruido (*low noise optical probe*, LNOP). Son muy útiles, aparte de los filtros adaptativos DST y SET ya descritos.

Los sensores LNOP minimizan los ruidos 1, 2, 3 y 4 antes mencionados. Tienen un detector fotográfico oculto en una cavidad plegable, que reduce el ruido de los mo-

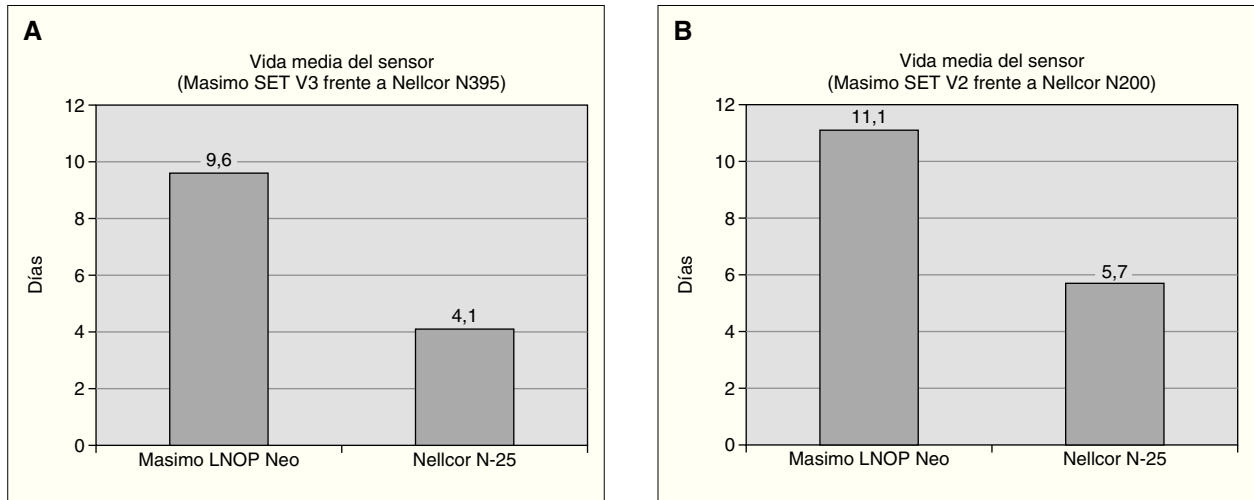


Figura 7. Vida media del sensor, según Wischniewski et al¹⁸ y Thomas et al¹⁹.

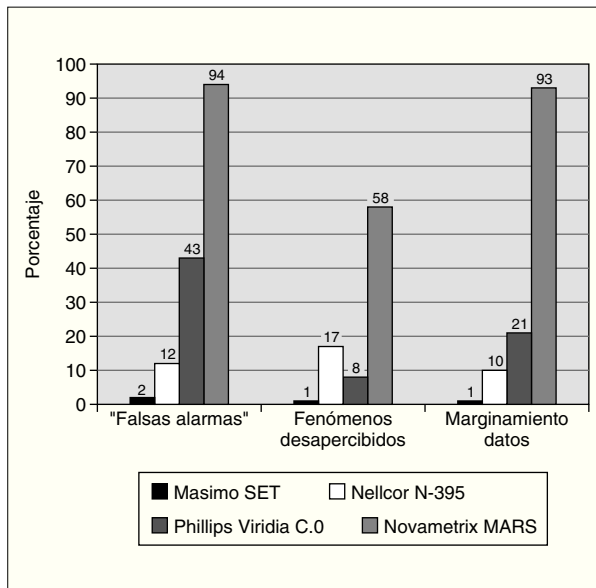


Figura 8. Hay et al²¹ compararon los monitores en niños de la UCIN no sedados que recibían oxígeno suplementario o ventilación mecánica. El porcentaje de falsas alarmas, fenómenos que pasaron desapercibidos y marginamiento de los datos varió significativamente.

vimientos y actúa como un amortiguador o absorbente de las sacudidas y disminuye también el ruido producido por la luz ambiental, el ruido electroquirúrgico y el producido por los movimientos del paciente. Estos sensores tienen un peso mínimo en comparación con los sensores estándar, lo que reduce el peso sobre el pie o la mano del niño. En algunos casos, debido al peso de los sensores convencionales se han producido secuelas (como 'pie caído') en el lugar del sensor y se ha requerido tratamiento para corregir la posición del pie. Los sensores

LNOP tienen también gran duración y el adhesivo presenta unas características especiales que le permiten recuperar sus propiedades adhesivas tras limpiarlo frotando con alcohol. Masimo también ha introducido recientemente un nuevo sensor, denominado *LNOP Blue Sensor*, diseñado para los pacientes cianóticos que tienen SatO₂ de 60 a 80%. Se están llevando a cabo estudios clínicos para averiguar en qué cuantía mejora este sensor la precisión de la SpO₂ en esta clase de pacientes.

En la figura 7 se muestra la vida media de los sensores LNOP según describen Wischniewski et al¹⁸ y Thomas et al¹⁹. La vida media de los sensores Masimo LNOP fue de 10-11 días, y la de los sensores Nellcor de 4-6 días, aproximadamente. Erler et al²⁰ describieron recientemente que la vida media de los sensores Masimo es más del doble que la de los sensores Nellcor, y que esta diferencia es constante en múltiples ámbitos con equipos de salud diversos, lo que implica un importante potencial para disminuir costes por el uso de los sensores Masimo desechables en la asistencia neonatal habitual.

RESUMEN DE ESTUDIOS CLÍNICOS QUE VALORAN EL COMPORTAMIENTO DE LOS MONITORES DE SATURACIÓN

Los fabricantes de monitores de oximetría de pulso han introducido nuevas tecnologías que, según afirman, permiten detectar mejor los fenómenos hipoxémicos. Durante los últimos años se han realizado numerosos estudios para comparar las respuestas de los monitores; algunos de ellos ya se han mencionado previamente en este trabajo. La literatura médica apoya claramente el hecho de que para medir la saturación no es indiferente el monitor de SpO₂ empleado, y que los avances de los conocimientos tecnológicos y científicos no pueden ignorarse en la asistencia del recién nacido enfermo. Como las mejoras en el procesado de la señal y en algoritmos para rechazar

datos influyen sobre el valor de SpO₂, los clínicos deben conocer los hallazgos reales de estudios reportados en trabajos revisados por expertos, en contraposición a las afirmaciones realizadas por fabricantes o agentes de venta.

En 2002, Hay et al²¹ revelaron que las alarmas falsas, los fenómenos omitidos y los datos marginados son notable y significativamente menores con la tecnología Masimo SET y que el peor rendimiento fue con Novamatrix MARS (fig. 8). Hay et al²¹ compararon varios monitores en recién nacidos en UICN, no sedados, que recibían oxígeno suplementario o ventilación mecánica. En comparación con Nellcor, Masimo SET tuvo un 86 % menos de falsas alarmas, que además fueron de duración más breve, lo que disminuyó en el 92 % el tiempo total de alarma. Las falsas desaturaciones, los datos marginados y las falsas bradicardias fueron menores con Masimo SET y su capacidad de detectar verdaderas desaturaciones y bradicardias fue máxima. Masimo SET identificó casi todos los episodios de bradicardia, frente al 14 % con Nellcor. Como hecho muy notable, estos llamados “dispositivos de nueva generación” diferían de forma considerable en cuanto a su capacidad para detectar cambios en la frecuencia cardíaca: la incidencia de congelamiento de la frecuencia del pulso durante períodos de cambios en la frecuencia cardíaca en el ECG fue de 0 sólo con Masimo²¹.

Sahni et al²² compararon Masimo frente a Nellcor en diferentes períodos en niños que sufrían dolor por la circuncisión. Los autores hallaron que la variabilidad y la incidencia de artefactos eran significativamente menores con Masimo SET, y que la frecuencia cardíaca era más exacta y con menos errores durante el procedimiento. La cuantía de artefactos fue 5 veces menor, incluso 50 veces menor en algunas ocasiones, y se produjo un número significativamente más reducido de falsas alarmas. Los autores concluyeron que la monitorización con Masimo SET era continua y mucho más precisa en todas las circunstancias estudiadas, en comparación con Nellcor.

Goldstein et al²³ informaron de que los monitores se comportan también de un modo diferente en cuanto a su capacidad para seguir cambios importantes en la frecuencia cardíaca. Con Phillips HP, los cambios en la frecuencia cardíaca pasaron desapercibidos en el 30 % de las ocasiones; con Nellcor, en el 18 %, y con Masimo SET, sólo en el 1 %. Barker²⁴ informó sobre la oximetría de pulso “resistente al movimiento”, y señaló que el oxímetro de pulso Masimo exhibía el mejor rendimiento de los 20 dispositivos estudiados.

Durbin y Rostow²⁵ mostraron que Masimo SET en comparación a Ohmeda 374 se asoció con tasas más bajas de fallos en la medición, menos extracciones para análisis de gases en sangre arterial y períodos más breves con oxígeno en el postoperatorio de adultos. Esta importante investigación fue una de las primeras que comparó el impacto de las diferentes tecnologías de la oximetría de pulso sobre los procesos de cuidado y la evolución de los pa-

cientes, y los autores informaron también que Masimo SET disminuyó condiciones latentes unidas a errores médicos²⁵.

Robertson y Hoffman²⁶ investigaron recientemente los efectos de la integridad de la señal y de la saturación sobre la disponibilidad de datos en tres monitores. Los autores compararon el informe de los datos, el rendimiento heurístico de la señal y la concordancia entre Nellcor N-395, Masimo SET y GE Solar 8000, así como los efectos de ciertas condiciones sobre la integridad de la señal y la SatO₂ arterial. La investigación de las tecnologías se llevó a cabo por comparación a ciegas. Se observó que con señales de mala calidad, movimientos o hipoxemia, los nuevos oxímetros no son clínicamente equivalentes entre sí ni con el oxímetro Solar 8000, más antiguo. También se halló que la concordancia entre los dispositivos se deterioraba en presencia de baja calidad de la señal, movimientos o hipoxemia. Masimo aportó menos datos cuestionables que Nellcor en este estudio ciego²⁶.

Kawagishi et al²⁷ compararon los tiempos de fracaso de los oxímetros de pulso durante la hipoperfusión obtenida con un manguito en sujetos voluntarios. Los autores compararon cuatro monitores (Masimo SET, Nellcor N-395, Nellcor N-20PA y Nellcor D-25) valorando el tiempo de fracaso de cada oxímetro de pulso, así como el tiempo transcurrido hasta el pico de presión arterial, el tiempo hasta la pérdida de la señal, el tiempo hasta la recuperación de la señal y el intervalo entre fallos. El tiempo hasta la pérdida de la señal fue significativamente más prolongado con Masimo que con cualquiera de los otros oxímetros de pulso. Masimo mostró además tiempos significativamente más cortos hasta la recuperación de la señal, el intervalo entre fallos fue notablemente mejor, y no perdió la señal tan rápidamente como los otros oxímetros estudiados. Las observaciones de este estudio muestran que se obtienen datos más exactos con menos alarmas falsas al utilizar los oxímetros Masimo SET²⁷.

Bohnhorst et al²⁸ efectuaron un estudio muy revelador en recién nacidos pretérmino no sedados (edad gestacional mediana de 25 semanas, con límites de 24-30 semanas), con el fin de averiguar la fiabilidad de los monitores para detectar hipoxemia y bradicardia. Para la comparación se utilizaron registros prolongados de TcPO₂ y frecuencia cardíaca mediante otros monitores. Se analizaron los registros en relación a episodios con TcPO₂ menor de 40 mmHg o con frecuencia cardíaca inferior a 80 lat./min durante más de 5 s. En este estudio hubo un total de 202 descensos de la PO₂; el 5,4 % de los episodios hipoxémicos pasaron desapercibidos con uno de los nuevos instrumentos (Nellcor), y sólo el 0,5 % de los episodios quedaron sin registrar con el otro instrumento (Masimo). Como hecho de interés, de un total de 54 episodios bradicárdicos, sólo fueron identificados 14 por parte de todos los oxímetros estudiados; el 69 % de los episodios no se detectaron con el monitor Nellcor, y sólo el 7 % pasaron sin detectar con el instrumento Masimo.

Así pues, al parecer, la reducción en la tasa de alarmas falsas lograda por Nellcor se conseguiría a expensas de una identificación no fidedigna y/o tardía de la hipoxemia y la bradicardia²⁸.

En una investigación reciente en un modelo de experimentación animal con baja perfusión de etiología infecciosa, Hummler et al²⁹ mostraron que la baja perfusión causada por sepsis puede originar mediciones inexactas de la SpO₂, pero que los episodios en este modelo animal fueron menos comunes con Masimo SET que con Nellcor Oxismart XL. Los autores mostraron que, en comparación con la cooximetría, hubo menos episodios de falsa lectura de la SpO₂ con Masimo SET y que el error medio SpO₂-SatO₂ era también significativamente diferente entre ambos dispositivos.

La nueva tecnología de extracción de señal SET ha sido comparada también por Irita et al³⁰ durante el *bypass* cardiopulmonar hipotérmico con flujo no pulsátil. El dispositivo Masimo SET obtiene una SpO₂ precisa de un modo significativamente más frecuente y prolongado que un oxímetro convencional y muestra su utilidad para monitorizar la SpO₂ durante hipoperfusión³⁰. Además, el índice de perfusión (*Perfusion index*) indica la potencia de la señal del pulso arterial y podría ser de gran valor para diagnosticar los problemas y la gravedad de la enfermedad³¹.

Estos y otros autores han efectuado diversos estudios comparativos. A través de un resumen independiente y objetivo de la literatura médica, en la figura 9 se resume el número de estudios que se han realizado hasta la fecha comparando Masimo SET frente a cualquier otro oxímetro. Como puede apreciarse, Masimo ha demostrado su superioridad en todos los casos excepto en dos; en un estudio, la valoración fue neutra, sin mostrar ventajas del otro monitor. En todos los estudios independientes y objetivos no se halló ningún monitor superior a Masimo SET (los autores pueden proporcionar la lista completa de la bibliografía pertinente para cualquiera que esté interesado en consultar la evidencia actual con detalle: asola2@emory.edu).

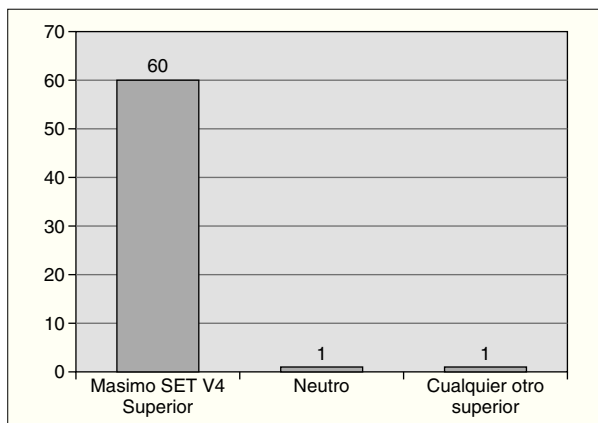


Figura 9. Comparación de los estudios disponibles.

COMENTARIOS FINALES

Se ha demostrado que la oximetría de pulso es muy eficaz para ayudar a los clínicos a detectar la hipoxemia, pero es necesario saber más acerca de la hiperoxemia. Con muchos monitores resulta difícil obtener lecturas precisas durante períodos de movimientos, baja perfusión y “ruido”, lo que da lugar a frecuentes y molestas alarmas o a falsas lecturas. Las tecnologías de los monitores de SpO₂ denominadas de “próxima generación” se comercializan para lograr valores exactos, ya que las anteriores tecnologías convencionales no han podido conseguirlo. La pregunta que debemos plantearnos como clínicos es la de saber si estas nuevas tecnologías están a la altura de lo que proclaman sus fabricantes. Como clínicos, hemos de conocer la capacidad de cada monitor para reducir de modo preciso las molestas alarmas y al mismo tiempo valorar la evidencia en relación a alarmas que se pasan por alto y otros muchos factores que se han expuesto en este trabajo. Es sólo al evaluar estudios objetivos, revisados por expertos, cuando en calidad de clínicos podremos: *a)* conocer las diferencias existentes entre los distintos monitores, y *b)* ofrecer a nuestros pacientes la tecnología más precisa para su bienestar. Los estudios disponibles en los trabajos revisados por expertos deben tener prioridad cuando los proveedores de salud y las instituciones de asistencia sanitaria toman decisiones para la atención a los pacientes, incluyendo la adquisición de monitores. Además, debemos conocer la evidencia sobre el coste más bajo de la mejor tecnología. Diversos hospitales de Estados Unidos han ahorrado 100.000 dólares o más cada año después de adoptar la tecnología de Masimo SET. Los monitores de SpO₂ con mayor precisión y capacidad más refinada para resolver la mayoría de los artefactos y aumentar la sensibilidad cuando existen bajos valores de flujo sanguíneo, amplitud del pulso y oxigenación de la sangre, garantizan una mejor asistencia clínica, disminuyen la necesidad de medir la PaO₂, y es de esperar que algún día puedan lograr que ésta quede obsoleta.

Sobre la base de las pruebas científicas disponibles, nosotros recomendamos el uso de la monitorización de la SpO₂ con la nueva tecnología SET, así como evitar responder a “falsas alarmas” y mantener límites prefijados para las alarmas mientras el niño esté recibiendo una FiO₂ superior a 0,21 durante los períodos de alto riesgo para el desarrollo, comenzando en la sala de partos desde el momento del nacimiento. Finalmente, también se recomienda manejar al niño con SatO₂ que, por las conocidas relaciones fisiológicas existentes entre la hemoglobina y el oxígeno, conduzcan a una PaO₂ que “no sea alta ni baja”, de acuerdo a los valores actualmente aceptados.

El empleo de monitorización de SpO₂ más adecuada en la UCIN mejora la confianza del clínico en los valores de SpO₂, lo que conducirá a una dosificación más juiciosa del oxígeno, con una posible disminución de los efectos hipóxicos e hiperóxicos. Disminuir estos últimos es muy

importante, ya que han sido lamentablemente comunes en neonatología. La tecnología más fidedigna también conduce a realizar menos análisis confirmatorios de gases en sangre arterial, a un destete más rápido de la ventilación mecánica y a costes más bajos.

Somos conscientes de que nadie sabe cuál es la gama de saturaciones “mejor” o “ideal” para todos los niños pretérmino de cualquier edad gestacional y posnatal. Esta cuestión merece un estudio detallado. Sin embargo, la erradicación de algunas prácticas perniciosas no equivale a llevar a cabo sistemáticamente y de un modo rígido prácticas no demostradas. Cuidando “los detalles” se marca la diferencia entre el éxito y el fracaso, la mediocridad y la excelencia. La toma de conciencia de hechos sabidos y demostrados disminuirá la brecha o distancia existente entre el conocimiento y la práctica clínica. Si se presta atención a los “detalles”, se puede lograr una diferencia clínica y mejorar la evolución y los resultados.

El Dr A. Sola dicta conferencias en relación a oxigenoterapia, niveles de oxigenación y monitores de saturometría. Masimo Corporation provee fondos 4-8 veces por año para desplazamientos y honorarios y es uno de los diversos patrocinadores de eventos educativo-científicos anuales dirigidos por el Dr. A. Sola.

RECONOCIMIENTOS

Estamos agradecidos al Sr. J. Kiani por la revisión crítica del manuscrito y sus útiles sugerencias en aspectos técnicos y al ‘Goddard Scholarship’ de Emory Children’s Research Center por el apoyo brindado a uno de los autores (A.S.)

BIBLIOGRAFÍA

- Berlin SL, Branson BS, Capps JS, Cecil WT, Harris KW, Kochansky MT. Pulse oximetry: A technology that needs direction. *Respir Care*. 1988;33:243-44.
- Severinghaus JW. Discussion II. En: Payne JP, Severinghaus JW, editors. *Pulse Oximetry*. London: Springer-Verlag; 1986. p. 45-53.
- Gerstmann D, Berg R, Haskell R, Brower C, Wood K, Yoder B, et al. Operational evaluation of pulse oximetry in NICU patients with arterial access. *J Perinatol*. 2003;23:378-83.
- Robertson FA, Hoffman GM. Clinical evaluation of the effects of signal integrity and saturation on data availability and accuracy of Masimo SE and Nellcor N-395 oximeters in children. *Anesth Analg*. 2004;98:617-22.
- Thilo EH, Park-Moore B, Berman ER, Carson BS. Oxygen saturation by pulse oximetry in healthy infants at an altitude of 1610 m (5280 ft). What is normal? *Am J Dis Child*. 1991;145:1137-40.
- Niermeyer S, Shaffer EM, Thilo E, Corbin C, Moore LG. Arterial oxygenation and pulmonary arterial pressure in healthy neonates and infants at high altitude. *J Pediatr*. 1993;123:767-72.
- Kopotic R, Linder W. Assessing high-risk infants in the delivery room with pulse oximetry. *Anesth Analg*. 2002;94:531-6.
- Bowton DL, Scuder PE, Haponik EF. The incidence and effects on outcome of hypoxemia in hospitalized medical patients. *Am J Med*. 1994;97:38-46.
- Bowton DL, Scuder PE, Harris L, Haponik EF. Pulse oximetry monitoring outside the intensive care unit: Progress or problem. *Ann Intern Med*. 1991;115:450-4.
- Bohnhorst B, Peter CS, Poets CF. Detection of hyperoxaemia in neonates: Data from three new pulse oximeters. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed*. 2002;87:F217-9.
- Salzer JW. Neonatal and pediatric pulse oximetry. *Respir Care*. 2003;48:386-96.
- Poets CF, Urschitz MS, Bohnhorst B. Pulse oximetry in the neonatal care unit. Detection of hyperoxemia and false alarm rates. *Anesth Analg*. 2002;94 (Suppl):S41-S43.
- Chow LC, Wright KW, Sola A, for the CSMC Oxygen Administration Study Group. Can changes in clinical practice decrease the incidence of severe retinopathy of prematurity in very low birth weight infants? *Pediatrics*. 2003;111:339-45.
- Sola A, Chow L, Rogido M. Retinopatía del prematuro y oxigenoterapia: una relación cambiante. *ANALES ESPAÑOLES DE PEDIATRÍA. An Pediatr (Barc)*. 2005;62:48-63.
- Suzuki YJ, Forman HJ, Sevanian A. Oxidants as stimulators of signal transduction. *Free Radic Biol Med*. 1997;22:269-85.
- Suzuki YJ, Forman HJ, Sevanian A. Oxidants as stimulators of signal transduction. *Free Radic Biol Med*. 1997;22:269-85.
- Felderhoff-Mueser U, Bittigau P, Sifringer M, Jarosz B, Korobowicz E, Mahler L, et al. Oxygen causes cell death in the developing brain. *Neurobiol Dis*. 2004;17:273-82.
- Wischniewski E, Erler T, Avenarius S. Multicenter trial of neonatal pulse oximeter sensor usage: A difference between manufacturers. *Anesth Analg* 2002;94:S110(A21).
- Thomas A, Holmes M, Vogt J, Gangitano E, Stephenson C, Liberman R. Useful life of pulse oximeter sensors in a NICU. *Resp Care*. 1998;43:860.
- Erler T, Avenarius S, Wischniewski E, Schmidt K, Klaber HG. Longevity of Masimo and Nellcor pulse oximeter sensors in the care of infants. *J Perinatol*. 2003;23:133-5.
- Hay WW, Rodden DJ, Collins SM, Melaria DL, Hale KA, Faushaw LM. Reliability of conventional and new pulse oximetry in neonatal patients. *J Perinatol*. 2002;22:360-6.
- Sahni R, Gupta A, Ohira-Kist K, Rosen TS. Motion resistant pulse oximetry in neonates. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed*. 2003;88:F505-8.
- Goldstein MR, Furman GI, Pernia ML, Lawas-Alejo P, Yang LL, Sindel BD, et al. Performance of motion-resistant pulse oximeters in tracking neonatal heart rate variability. *Anesth Analg*. 2002;94:S102(A5).
- Barker SJ. The effects of motion and hypoxemia upon the accuracy of 20 pulse oximeters in human volunteers. *Sleep*. 2001;24:A406-7.
- Durbin CG, Rostow SK. More reliable oximetry reduces the frequency of arterial blood gas analysis and hastens oxygen weaning after cardiac surgery: A prospective, randomized trial of the clinical impact of the new technology. *Crit Care Med*. 2002;30:1735-40.
- Robertson FA, Hoffman GM. Clinical evaluation of the effects of signal integrity and saturation on data availability and accuracy of Masimo SET and Nellcor N-395 Oximeters in children. *Anesth Analg*. 2004;98:617-22.
- Kawagishi T, Kanaya N, Nakawama M, Kurosawa S, Namiki A. A comparison of the failure times of pulse oximeters during blood pressure cuff-induced hypo perfusion in volunteers. *Anesth Analg*. 2004;99:793-6.
- Bohnhorst B, Peter CS, Owitz CF. Pulse oximeters’ reliability in detecting hypoxemia and bradycardia; comparison between a conventional and two new generations of oximeters. *Crit Care Med*. 2004;28:165-8.
- Hummeler HD, Englemann A, Pohlandt F, Hogelj, Franz AR. Accuracy of pulse oximetry readings in an animal model of low perfusion caused by emerging pneumonia and sepsis. *Intens Care Med*. 2004;30:709-13.
- Irita K, Kai Y, Akiyoshi K, Tanaka Y, Dakahashi S. Performance evaluation of a new pulse oximeter during mild hypothermic cardiopulmonary bypass. *Anesth Analg*. 2003;96:11-4.
- De Felice C, Latini G, Vacca P, Kopotic RJ. The pulse oximeter perfusion index as a predictor for high illness severity in neonates. *Eur J Pediatr*. 2002;161:561-2.