

apunts

MEDICINA DE L'ESPORT

www.apunts.org



ARTÍCULO ESPECIAL

La pulsioximetría y su aplicación en pruebas de esfuerzo máximo

César Marca Fuertes^{a,*}, Mercedes Galindo Canales^{a,b}, Francisco Miguel-Tobal^b y Pilar Martín Escudero^b

^a Escuela Profesional de Medicina de la Educación Física y del deporte, Facultad de Medicina, Universidad Complutense de Madrid, España

^b I.N.E.F. de Madrid de la Universidad Politécnica de Madrid, España

Recibido el 21 de abril de 2010; aceptado el 2 de noviembre de 2010

PALABRAS CLAVE

Pulsioximetría;
Saturación de oxígeno;
Ergometría;
Oxímetro de pulso;
Desaturación de oxígeno

KEYWORDS

Pulse oximetry;
Oxygen saturation;
Exercise stress test;
Pulse oximeter;
Oxygen desaturation

Resumen La pulsioximetría sirve para determinar el porcentaje de saturación de oxígeno que hay en sangre. Su mayor característica es que se trata de un método no invasivo y relativamente económico. Existen pocos estudios que relacionen pulsioximetría con actividad física, y los estudios que más abundan son los clínicos. Los autores revisan la definición de la oximetría de pulso, los fundamentos en los cuales se basa. Se revisan la aplicación de la pulsioximetría a las pruebas de esfuerzo máximo, así como el comportamiento de la saturación de oxígeno en sangre durante la realización de pruebas de esfuerzo máximo. Además, se revisan los diferentes estudios acerca de los valores de saturación de oxígeno en sangre durante la realización de ejercicio físico y su correlación con otras variables ventilatorias. Se analizan las consecuencias del uso de la pulsioximetría en pruebas de esfuerzo máximo.

© 2010 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

The pulse oximetry and its use in maximal exercise test

Abstract Pulse oximetry is used to determine the percentage saturation of oxygen in blood. Its main feature is that it is a noninvasive and relatively inexpensive. There are few studies relating physical activity and pulse oximetry with most abundant studies are clinical trials. The authors review the definition of pulse oximetry, the grounds upon which it is based. We review the application of pulse oximetry to maximum exercise testing, and the behavior of oxygen saturation in the blood for testing of maximum effort. In addition, different studies on the oxygen saturation values in blood during physical exercise and its correlation with other ventilatory variables. We analyze the consequences of the use of pulse oximetry in tests of maximal effort.

© 2010 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

* Autor para correspondencia.

Introducción

La práctica deportiva es uno de los pilares básicos de la sociedad de bienestar en la cual vivimos. El ejercicio físico regular bien realizado nos sirve para mejorar nuestras capacidades físicas básicas. Es importante saber que cuando los ejercicios se realizan de manera regular, se producen una serie de efectos a corto y a largo plazo en el organismo humano. Dichas modificaciones se realizan en todos los sistemas del cuerpo humano, pero en especial en el sistema respiratorio¹⁻².

Relacionado con esto último, es necesario la búsqueda de métodos no invasivos y más económicos para la determinación de diferentes valores fisiológicos del cuerpo humano durante la realización de una prueba de esfuerzo máximo.

La pulsioximetría

La oximetría de pulso es la presión parcial de oxígeno en sangre³. La pulsioximetría se utiliza durante la monitorización de pacientes con anestesia, en control de neonatos, en evaluación y seguimiento de trastornos pulmonares crónicos y nocturnos y en medicina deportiva. Además, para la aplicación de la oximetría de pulso al ejercicio físico, nos va a interesar la oximetría de pulso subcutánea. Esta oximetría es definida como la determinación del porcentaje de saturación de oxígeno en sangre con ayuda de métodos fotoeléctricos⁴ (fig. 1). Su uso se ha extendido en los últimos años en pruebas de esfuerzo en clínica, y en menor medida en el ámbito de la medicina deportiva⁴⁻⁸.

La combinación de la oximetría con la ergometría complementa la prueba de esfuerzo, gracias al control continuo de la saturación de oxígeno en el torrente sanguíneo. Esto es de suma importancia para el diagnóstico y valoración funcional del sistema respiratorio y circulatorio⁴.

Fundamentos de la pulsioximetría

El oxímetro de pulso se trata de un método espectrofotométrico de transiluminación, cuyo fundamento científico se basa en dos principios físicos:

- La conocida propiedad de la hemoglobina de presentar diferente espectro de absorción según su estado sea oxigenado o reducido.
- La presencia de una señal pulsátil generada por la sangre arterial pero relativamente independiente de la sangre venosa y capilar y otros tejidos^{4,7}.

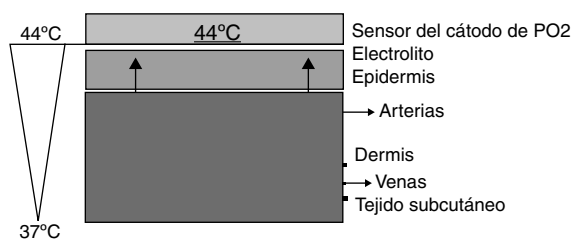


Figura 1 Principio de la medida de la presión de oxígeno. Modificaciones en la piel. Fuente: Chapuis⁵.

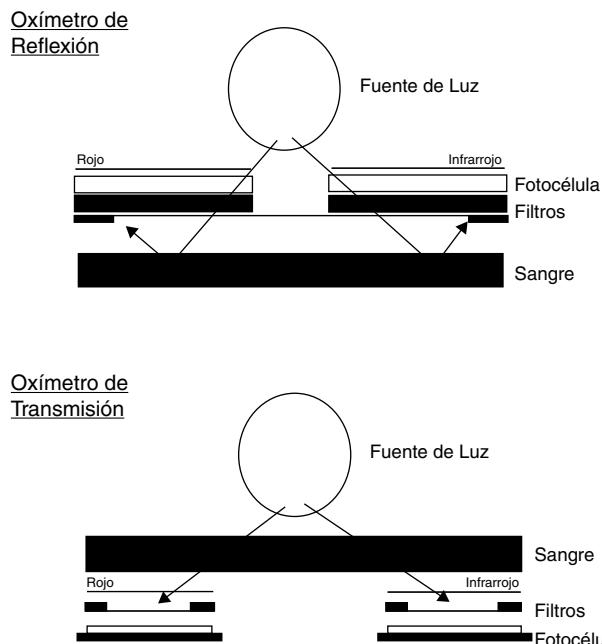


Figura 2 Principio de la oximetría de transmisión y reflexión. Fuente: Mellerowicz⁴.

Por otra parte, estos oxímetros pueden ser de dos tipos: de *transmisión* (la luz emitida por el sensor atraviesan las estructuras anatómicas y la luz que sale es la que recibe el sensor) o de *reflexión* (la luz emitida por el sensor se refleja en la estructura anatómica y la luz reflejada es la que se recibe en el sensor) (fig. 2).

Esta ley de transmisión o absorción de la luz establece que la concentración de un soluto en una solución se puede determinar haciendo pasar una luz, de longitud de onda conocida, a través de dicha solución y midiendo la luz incidente y la transmitida.

La ley física aplicada en este instrumento es la ley de Lambert-Beer, según la cual la intensidad de luz transmitida por un cuerpo es igual a la intensidad de luz que incide por una variable.

Estas condiciones no son aplicables en el medio clínico, por lo que los instrumentos de pulsioximetría, teóricamente basados en la ley de Lambert-Beer, requieren de correcciones empíricas a las que se llega mediante aplicación de la técnica a grandes poblaciones de individuos sanos, gracias a lo cual, se consigue un algoritmo mediante el cual el microprocesador del aparato interpreta la información obtenida a través de la medición⁴.

Aplicación de la oximetría a las pruebas de esfuerzo máximo

En la aplicación clínica de la oximetría de pulso, la cubeta sería el dedo o el lóbulo de la oreja, y la sustancia a determinar, la oxihemoglobina. La medida de la absorción de una luz de intensidad conocida a través del dedo o de la oreja permite calcular la saturación de la hemoglobina^{4,6}.

La importancia de la oximetría en la ergometría no reside tanto en la obtención de valores absolutos de saturación de oxígeno, para lo cual resulta más exacto el análisis directo de la muestra arterial, sino en el registro continuo

de cambios eventuales en la saturación de oxígeno y su realización por métodos incruentos desde los propios tejidos, haciendo de esta técnica una de fácil uso, confortable para el paciente, portátil y no demasiado cara^{4,6}.

Sin embargo, hay que subrayar que la oximetría ergométrica rinde un servicio valioso en las investigaciones de rutina. Pero en el caso de investigaciones más delicadas, y que deban ofrecer un estudio detallado de los procesos fisiológicos y patológicos de la respiración durante el esfuerzo físico, para algunos autores, sus servicios son más discutibles. Estas investigaciones, pues, sólo sean posibles por medio de la espirometría y por análisis de gases en sangre arterial, a través de las cuales también puede determinarse el contenido y la presión de CO₂ y el pH. Así, cuando se tiene sospecha de la existencia de alteraciones en la difusión, resulta valiosa sobre todo la combinación de la oximetría con el análisis directo de gases en sangre arterial, para diferenciar exactamente la causa de la caída de la saturación de oxígeno^{4,6}.

La oximetría ergométrica es un método apropiado para determinar el límite de esfuerzo cardiopulmonar, que se caracteriza por una caída significativa en la saturación arterial de oxígeno. Tanto el método de transmisión como el de reflexión de la luz pueden ser usados para fines prácticos si sus resultados son analizados con suficiente conocimiento y crítica adecuada^{4,6}.

En lo referente a los valores, Comroe y Walker han observado que la saturación de oxígeno de la sangre arterial asciende a 97,5% en personas sanas en reposo, mientras que para Mitschell y colaboradores es de $97,1 \pm 3,1\%$ ⁴.

Según varios autores (Bühlmann, Bühlmann y Schaub, Christensen y Högberg, Comroe y Walker, entre otros), las personas sanas que presentan una caída de la saturación de la sangre arterial, ésta es de carácter fisiológico cuando ocurre con un gran esfuerzo físico. En principio, se cree que este comportamiento es causado por la acidosis presente en niveles elevados de esfuerzo físico así como por aumento de la presión de CO₂ en la sangre.

En lo que se refiere a la intensidad del esfuerzo, puede decirse que en las zonas de carga submáxima no se manifiesta un descenso constante del PO₂; es más un descenso inicial, más o menos acentuado, del PO₂, y se debe, como regla, a un valor aumentado del oxígeno durante el reposo⁴.

Así, respecto a las variaciones en la saturación arterial observadas después del máximo esfuerzo estudiado, Rasmussen et al⁹⁻¹⁰ han observado que la desaturación arterial asociada al esfuerzo máximo realizado está en proporción directa con la masa muscular puesto en movimiento, la concentración de lactato sanguíneo, de bicarbonato y la concentración de hidrogeniones^{6,9,10}.

Resulta digno de atención el hecho de la gran variación individual de los valores durante las fases de reposo y de recuperación, mientras que durante el esfuerzo se observa un agrupamiento importante alrededor del valor medio^{4,6}.

Los hombres entrenados, capaces de altos rendimientos, pueden realizar esfuerzos elevados sin presentar hiposaturación considerable de oxígeno. Durante los esfuerzos máximos, en las personas muy entrenadas se encuentra una hiposaturación de oxígeno (con hipercapnia y acidosis) que, en algunos casos, no llega a equilibrarse por completo, incluso con una elevación de la presión parcial alveolar de oxígeno durante la respiración^{4,6}.

De acuerdo con la proposición de Bühlmann, parece ser que los estadios con incrementos progresivos del esfuerzo de 10 a 30 vatios son la mejor manera de determinar la saturación arterial de oxígeno, gracias al mantenimiento de un esfuerzo estable⁴.

Acerca del comportamiento de la PO₂ arterial durante la recuperación, se informa unánimemente de un aumento intenso inmediatamente después del cese del esfuerzo. Las presiones parciales de oxígeno alcanzan por lo general sus valores de partida de 10 a 15 min después del fin del esfuerzo^{4,6}.

El oxímetro de pulso es un método de laboratorio no invasivo y una herramienta de diagnóstico para el seguimiento continuo de la SaO₂. Sin embargo, su precisión y su reproductibilidad continúan siendo dudosas por la acción de artefactos y otras variables¹¹.

Existen pocos estudios de validación que juzguen los resultados obtenidos por el oxímetro de pulso bajo condiciones de compromiso potencial del flujo sanguíneo periférico, a pesar del elevado número de factores que parecen afectar a la precisión del oxímetro cuando se usan durante el ejercicio y que necesitan ser investigados en los ensayos¹¹.

Entre ellos se incluyen la aparición de posibles artefactos, tales como la influencia del sudor y la perfusión local de los tejidos¹²⁻¹⁴. También tenemos los efectos mediados por el estrés (ejercicios u otros), que a su vez produce una vasoconstricción mediada por la influencia simpática, que reduce teóricamente el flujo de sangre, influyendo sobre la eficacia del oxímetro de pulso en determinadas condiciones¹²⁻¹⁴.

Uno de los problemas surgidos a la hora de su utilización es el factor de la temperatura corporal. Según estudios realizados, para la mejor utilización del oxímetro es necesario que la temperatura se mantenga entre 44 o 45 °C, y no a 37 °C, por los siguientes motivos (aunque se puedan producir pequeñas quemaduras en su aplicación a niños):

- Gracias a la vasodilatación cutánea que se produce durante el calentamiento de la piel, se crea un agrandamiento en los capilares dérmicos, favoreciendo a su vez un mejor aporte tisular de oxígeno y una desviación de la curva de saturación de la hemoglobina hacia la derecha. Esto contrarresta la actividad metabólica celular y el VO₂¹⁵⁻¹⁷.
- Por otra parte, a 41 °C la estructura lipídica de la capa córnea de la piel sufre una modificación de gel a sol, con lo que la resistencia a la difusión disminuye y la permeabilidad gaseosa se facilita entre 100 y 1.000 veces¹⁸. Incluso algunos estudios hablan de un cambio en la perfusión local que hace que la medida de la tensión de oxígeno arterial sea más pequeña que la que existe en el tejido¹⁹.

Además se está introduciendo en la práctica común de los especialistas en ciencias y medicina del deporte, como rutina, la monitorización de los niveles de SaO₂ con oxímetros de pulso, durante la realización de un ejercicio exhaustivo, para poder informar de las limitaciones en la forma física^{6,12-14}.

Actualmente está creciendo el interés del empleo del oxímetro de pulso en la valoración del sistema pulmonar como factor limitante en la forma física de los atletas de resistencia (amén de un efecto del pH), y ello mediante

la estimación de la fracción de oxihemoglobina arterial del total de la hemoglobina durante el ejercicio para evitar las inconveniencias y alteraciones azarosas asociadas a catéteres arteriales durante el ejercicio en humanos^{20,21}.

El principal problema con que nos encontramos radica en los pocos estudios existentes referentes tanto a la toma de muestra como a la validación del uso del oxímetro de pulso en población atlética durante el ejercicio^{6,12-14}.

Sobre los estudios efectuados al respecto hasta la actualidad y referidos en la bibliografía encontramos en primer lugar el estudio efectuado por Norton¹²⁻¹⁴, que observó la precisión del oxímetro de pulso en situaciones de esfuerzo intenso en 10 atletas sometidos a 3 diferentes pruebas de esfuerzo exhaustivo, una donde se requirió la intensidad del VO_2 máxima, otra donde se buscó el 115% del VO_2 máxima (S_{max}) y por último donde se determinaba el S_{max} cuando el flujo de oxígeno (FiO_2) sufría un incremento de 0,30^{6,12-14}.

Los resultados de este estudio indicaban una relativa gran subestimación de la SaO_2 cuando se monitorizaba usando el oxímetro de pulso con errores que se incrementaban en función de la severidad del ejercicio (incluso excedían en más de dos veces el nivel de tolerancia especificado por el rango de manufactura de la SaO_2 , observado en este estudio)^{6,12-14}.

En España, diversos estudios han demostrado que la oximetría en registro continuo era un método útil, sencillo y bastante preciso a la hora de estudiar la oxigenación en personas que realizan esfuerzo físico, aunque teniendo en cuenta que tiene alguna limitación, como pueden ser las interferencias producidas en la absorción espectrofotométrica^{6,22}.

La oximetría transcutánea, aplicada al estudio del transporte de oxígeno, permite un seguimiento continuo de lo que ocurre a nivel periférico, a diferencia de otras técnicas de medición externa cruenta⁶.

Durante la realización del estudio oximétrico en pruebas de esfuerzo máximo se producen diferentes problemas técnicos, derivados del movimiento del individuo durante la realización de las diferentes tipos de pruebas de esfuerzo⁶. Se encuentran mayor número de artefactos cuando estas pruebas se realizan en tapiz rodante y menos cuando se realizan en cicloergómetro²³.

En todos los deportistas estudiados se produce un descenso significativo de los valores de saturación transcutánea de oxígeno, sin que existan trastornos pulmonares previos que lo justifiquen y que está en función del esfuerzo desarrollado⁶.

Se produce una correlación significativa entre el tiempo de desaturación, medido en la oximetría en registro continuo durante el esfuerzo, y el consumo máximo de oxígeno. Esta correlación también existe con el tiempo de aparición de los umbrales aeróbico y anaeróbico, para atletas de ambos sexos^{6,24}. En estudios realizados con el objetivo de encontrar correlación entre las variables proporcionadas por la prueba de esfuerzo máximo y las variables de la oximetría de pulso transcutánea, se observan correlaciones entre el tiempo de desaturación y el consumo máximo de oxígeno y el umbral anaeróbico (segundo umbral del lactato). En estudios realizados con objetivo de buscar correlación entre las variables proporcionadas por la prueba de esfuerzo y las variables de la oximetría transcutánea se observan correlaciones entre el tiempo de desaturación y el consumo

máximo de oxígeno y el umbral anaeróbico (segundo umbral del lactato)^{24,25}.

A la hora de valorar la evolución que se produce en la saturación de oxígeno en el tiempo, si lo hacemos teniendo en cuenta el consumo máximo de oxígeno de cada individuo, obtenemos una correlación alta entre este último y el tiempo medio de desaturación de oxígeno⁶.

La correlación lineal instantánea entre la saturación de oxígeno y las variables ventilatorias (pulso, ventilación/minuto y consumo máximo de oxígeno) es estadísticamente significativa y de sentido contrario, lo cual nos lleva a la confirmación de que la aparición de la desaturación de oxígeno se debe al esfuerzo físico en los deportistas estudiados⁶.

Por último, destacar que la correlación entre la saturación de oxígeno y las variables ventilatorias (pulso, ventilación/minuto y consumo máximo de oxígeno) es más fuerte si se agrupan a los individuos por deportes practicados. Esto nos puede llevar a sugerir que la práctica deportiva influye en la significación de la regresión lineal^{6,26}.

Consecuencias del uso de la pulsioximetría en las pruebas de esfuerzo máximo

El uso de la oximetría de pulso en las pruebas de esfuerzo máximo para determinar los valores de saturación de oxígeno en los deportistas tiene las siguientes conclusiones:

- Los valores de saturación de oxígeno se obtienen de manera no invasiva²⁷.
- Los pulsioxímetros comerciales no sirven para determinar los valores de saturación de oxígeno durante la realización de pruebas de esfuerzo máximo²⁸⁻³¹.
- En diversos estudios, el comportamiento de la saturación de oxígeno durante la realización de pruebas de esfuerzo máximo ha sido similar según los valores obtenidos por pulsioximetría²⁸⁻³¹.
- No existen muchos estudios que relacionen oximetría de pulso con ejercicio físico. Los estudios que más existen son a nivel clínico.
- La oximetría ergométrica es un método apropiado para determinar el límite de esfuerzo cardiopulmonar.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

1. Åstrand PO, Rodahl K. *Fisiología del trabajo físico*. Buenos Aires: Panamericana; 1986.
2. Casaburi R. Physiologic responses to training. *Clin Chest Med*. 1994;15:215–28.
3. Rolly G, Versichelen L. Oxymétrie de pouls. *Ann Fr Anesth Réanim*. 1989;8:171–4.
4. Mellerowicz H. *Ergometría*. 3.^a ed. Buenos Aires: Panamericana; 1984.
5. Chapuis A. Mesure de la PO_2 transcutanéé. *Soins*. 1990;534:55–7.
6. Martín Escudero M. La oximetría en registro continuo en el esfuerzo máximo en distintas especialidades deportivas.

- [Tesis.] En: Medicina Interna. Madrid: Universidad Complutense de Madrid; 1997. p. 232.
7. Tobin RM, Pologe JA, Batchelder PB. A characterization of motion affecting pulse oximetry in 350 patients. *Anesthesia and analgesia*. 2002;94 Suppl 1:554–61.
 8. Breuer HW, Groeben H, Schöndeling H, Worth H. Comparative analysis of arterial oxygen saturations during exercise by oximetry, photometric measurements, and calculation procedures. *Int J Sports Med*. 1990;11:22–5.
 9. Whitney J. The measurement of oxygen tension in tissue. *Nurs Res (NY)*. 1990;39:203–6.
 10. Rasmussen J, Hanel B, Diamant B, Secher NH. Muscle mass effect on arterial desaturation after maximal exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 1991;23:1349–52.
 11. Norton LH, Squires B, Craig NP, McLeay G, McGrath P, Norton KI. Accuracy of pulse oximetry during exercise stress testing. *Int J Sports Med*. 1992;7:523–7.
 12. Morton RH. On a model in human bioenergetics. *Eur J Appl Physiol*. 1985;54:285–90.
 13. Morton RH. The critical power and related whole-body bioenergetic models. *Eur J Appl Physiol*. 2005;96:339–54.
 14. Morton RH. A three component model of human bioenergetics. *J Math Biol*. 1986;24:451–66.
 15. Vayssairat M, Baudot N. La microcirculation: Mesure de la pression partielle transcutanée d'oxygène et intérêt de l'hémodilution. *Presse Med*. 1989;18:1315–6.
 16. Tremper K, Waxman K, Shoemaker W. Effects of hypoxia and shock on transcutaneous pO₂ values in dogs. *Crit Care Med*. 1979;12:526–31.
 17. Lübbers D. Theoretical basis of the transcutaneous blood gas measurements. *Crit Care Med*. 1981;9:721–33.
 18. Davis SL, Fadel PJ, Cui J, Thomas GD, Crandall CG. Skin blood flow influences near-infrared spectroscopy-derived measurements of tissue oxygenation during heat stress. *J Appl Physiol*. 2006;100:221–4.
 19. Larsen PN, Moesgaard F, Gottrup F, Helledie N. Characterization of the silicone tonometer using a membrane-covered transcutaneous electrode. *Scand J Clin Lab Invest*. 1989;49:513–9.
 20. Martin D, Powers S, Cicale M, Collop N, Criswell D. Validity of pulse oximetry during exercise in elite endurance athletes. *J Appl Physiol*. 1992;72:455–8.
 21. Rasmussen J, Hanel B, Diamant B, Secher N. Muscle mass effect on arterial desaturation after maximal exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 1991;23:1349–52.
 22. González A, Gómez Arnau J, Pensado A. Limitación en la utilización clínica de la pulsioximetría. *Rev Esp Anestesiología Reanim*. 1992;39:100–6.
 23. Martín-Escudero P, Miguel-Tobal F, Bilbao Monasterio A, Galindo Canales M, Silveira Martín JP, Dotor Castilla ML, et al. Pulse rate measurement from transmittance photoplethysmography in cycle ergometer test. In: *IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference [Abstract]*. 2010. p. 1039.
 24. Martín-Escudero P, Miguel-Tobal F, Bilbao Monasterio A, Galindo Canales M, Silveira Martín JP, Dotor Castilla ML, et al. Aportaciones fisiológicas de la medida continua de la saturación de oxígeno en atletas de ambos sexos que realizan pruebas de esfuerzo máximas. *Selección*. 2006;15:132–43.
 25. Galindo Canales M. La determinación de la saturación de oxígeno en la prueba de esfuerzo como parámetro útil de determinación del umbral anaeróbico [Trabajo de investigación para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (D.E.A.) y la Suficiencia Investigadora, dirigido por Pilar Martín Escudero]. Septiembre de 2009.
 26. Siegler JC, Robergs RA, Faria EW, Wyatt FB, McCarthy J. Noninvasive profiling of exercise-induced hypoxemia in competitive cyclist. *Research in Sports Medicine*. 2007;15:61–6.
 27. Mendelson Y. Pulse oximetry: Theory and applications for noninvasive monitoring. *Clin Chem (Baltimore)*. 1992;38:1601–7.
 28. Martin D, Powers S, Cicale M, Collop N, Huang D, Criswell D. Validity of pulse oximetry during exercise in elite endurance athletes. *J Appl Physiol*. 1992;72:455–8.
 29. Orenstein DM, Curtis SE, Nixon PA, Hartigan ER. Accuracy of three pulse oximeters during exercise and hypoxemia in patients with cystic fibrosis. *Chest*. 1993;104:1187–90.
 30. Iyriboz Y, Powers S, Morrow J, Ayers D, Landry G. Accuracy of pulse oximeters in estimating heart rate at rest and during exercise. *Br J Sports Med*. 1991;25:162–4.
 31. Rebuck A, Chapman K, D'Urzo A. The accuracy and response characteristics of a simplified ear oximeter. *Chest*. 1983;83:860–8.