



Revista Andaluza de Medicina del Deporte

<https://ws072.juntadeandalucia.es/ojs>



Revisión

Uso de la espectroscopia de infrarrojo cercano para la medición de la saturación de oxígeno muscular en el deporte



C. D. Gómez-Carmona^{a*}, A. Bastida-Castillo^b, J. Pino-Ortega^b

^a Grupo de Optimización del Entrenamiento y el Rendimiento Deportivo (GOERD). Facultad de Ciencias del Deporte. Universidad de Extremadura, Cáceres, España.

^b Departamento de Actividad Física y Deporte. Facultad de Ciencias del Deporte. Universidad de Murcia, San Javier, España

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO: Recibido el 5 de mayo de 2017, Aceptado el 19 de julio de 2017, Online el 18 de enero de 2019

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue revisar el funcionamiento de la espectroscopia de infrarrojo cercano y sus diferentes aplicaciones en el ámbito deportivo como son: la descripción de las exigencias oxidativas mediante su monitorización tanto en contextos de resistencia y fuerza, y la evaluación de su aplicación en programas de entrenamiento. Para ello se realizó una búsqueda bibliográfica en las bases de datos Web of Science y Scopus en la que se obtuvieron, después de la exclusión de artículos que no se ajustaron a los criterios de inclusión, un total de 38 artículos originales de investigación. Los datos resultantes que fueron extraídos de los estudios incluidos fueron datos de los participantes, parámetros del programa de entrenamiento o ejercicio, los músculos evaluados, el dispositivo y método de evaluación y los principales resultados.

Palabras clave: NIRS, saturación de oxígeno muscular, resistencia, fuerza, programas de entrenamiento, monitorización.

Using near-infrared spectroscopy technology for measuring muscle oxygen saturation in sport

ABSTRACT

The objective of this research was to review the operation of near-infrared spectroscopy and its different applications in the sports field, such as: the description of oxidative requirements through its monitoring in both resistance and strength contexts and the evaluation of its application in training programs. A bibliographic search was carried out in the Web of Science and Scopus databases, in which a total of 38 original research articles were obtained after exclusion of articles that did not meet the inclusion criteria. The resulting data that were extracted from the included studies were data of the participants, parameters of the training program or exercise, the muscles evaluated, the device and method of evaluation and the main results.

Keywords: NIRS, muscle oxygen saturation, endurance, strength, training programs, monitoring.

Uso da tecnologia de espectroscopia de infravermelho próximo para medir a saturação de oxigênio muscular no esporte

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi revisar o funcionamento da espectroscopia do infravermelho próximo e suas diferentes aplicações no campo esportivo, tais como: a descrição dos requisitos oxidativos através de seu monitoramento em contextos de resistência e força e a avaliação de sua aplicação em programas de treinamento. Uma pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases de dados da Web of Science e Scopus, no qual foram obtidos 38 artigos de pesquisa originais após a exclusão de artigos que não atendiam aos critérios de inclusão. Os dados resultantes que foram extraídos dos estudos incluídos foram dados dos participantes, parâmetros do programa de treinamento ou exercício, os músculos avaliados, o dispositivo e o método de avaliação e os principais resultados.

Palavras-chave: NIRS, saturação de oxigênio muscular, resistência, força, programas de treinamento, monitoramento.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: cdgomezcarmona@unex.es (C. D. Gómez-Carmona).

<https://doi.org/10.33155/j.ramd.2017.07.003>

Consejería de Educación y Deporte de la Junta de Andalucía. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Introducción

A lo largo de los años, la tecnología aplicada a las ciencias de la actividad física y del deporte ha contribuido enormemente tanto a la investigación como al control del entrenamiento. La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) es un método tecnológico para la medición de un gran potencial de posibles variables en diferentes ámbitos de estudio (agricultura, cardiología, neurología, ciencias del deporte, etc.), que está en continuo desarrollo desde los años 60¹. Numerosos estudios experimentales han abordado la fiabilidad y validez de esta tecnología, así como las posibles aplicaciones que pueden contribuir en cualquier campo de esta ciencia. En el ámbito de las ciencias de la actividad física y el deporte recientemente el uso de la tecnología NIRS está siendo muy extendido para medir la oxigenación muscular durante el ejercicio físico². A pesar de ello, sigue existiendo un gran campo de actuación con esta tecnología que pueda dar respuesta a incógnitas en el área de la fisiología del ejercicio, que por su complejo método de estudio, no se ha desarrollado su conocimiento de forma integral². Por ello, esta revisión pretende proporcionar información actualizada sobre la utilización de la tecnología NIRS en el ámbito del deporte.

Método

Para la búsqueda bibliográfica y obtención de artículos publicados de investigaciones científicas originales se utilizaron las bases de datos Web Of Science (WOS) y Scopus (S). La búsqueda fue llevada a cabo desde el día 21 de enero hasta el 27 de marzo del 2016. El gestor bibliográfico utilizado para la recopilación de todos los artículos usados en esta revisión ha sido Zotero. Para la obtención de los artículos, se incluyeron varias combinaciones de palabras clave: "NIRS and sport" (WOS=132, S=76), "NIRS and strength training" (WOS=5, S=4), "NIRS and resistance training" (WOS=13, S=2) and "muscle oxygenation and sport" (WOS=113, S=70). También se incluyeron artículos citados y referenciados en investigaciones ya encontradas. Los criterios de inclusión que se establecieron fueron los siguientes: (i) artículos originales experimentales o revisiones que hayan utilizado la tecnología de espectroscopia de infrarrojo cercano para la monitorización de la oxigenación muscular; (ii) artículos publicados en revistas incluidas en el Journal Citation Reports (JCR); (iii) estudios que se encuentren enmarcados en contextos deportivos. Uno de los autores desarrolló la búsqueda y registró los manuscritos en el gestor bibliográfico Zotero. Otros dos autores independientemente evaluaron los títulos y los resúmenes de cada artículo en el registro realizado y excluyeron los artículos que no se ajustaban a los criterios de inclusión. A continuación, se realizó una revisión del texto completo de los artículos. Para la inclusión final, ambos autores revisaron el acuerdo de su registro de artículos aceptados. En caso de desacuerdo, se llevó a cabo una discusión que involucró al tercer revisor. Estas combinaciones de búsqueda dieron como resultado la inclusión final de 38 artículos originales. Los datos que fueron extraídos de los estudios incluidos fueron datos de los participantes, parámetros del programa de entrenamiento o ejercicio, músculos evaluados, dispositivo y método de evaluación y principales resultados obtenidos.

Funcionamiento y principios básicos de la tecnología NIRS

NIRS es un método de medición no invasivo de la concentración de oxígeno en sangre utilizando rayos de infrarrojo cercano. En sus orígenes fue comercializado en 1996 (Hitachi Co. Ltd.) básicamente para mostrar la actividad cerebral en neurología¹. Utiliza longitudes de onda en el intervalo de 700-850nm² la cual permite una mejor penetración en el tejido biológico que la luz visible³. En nuestro cuerpo, el oxígeno es transportado por la hemoglobina y los niveles varían con la intensidad de la actividad

física debido a una disminución del pH y un aumento de la temperatura provocados por el incremento del metabolismo anaeróbico³.

En la figura 1, se muestra el principio básico de funcionamiento de la tecnología NIRS. La luz del infrarrojo cercano es transmitida hacia el cuerpo por el emisor, y el receptor recibe esa luz una vez transportada por el cuerpo. Según Cornachione y cols.⁴, NIRS es una técnica válida para estimar la saturación de oxígeno muscular (%SmO₂), que es la relación de la oxi-hemoglobina con respecto a la hemoglobina total en la sangre, expresado en porcentaje. Así, los cambios en SmO₂ durante el ejercicio están directamente relacionados con el balance entre la disponibilidad de oxígeno en sangre y su uso en los músculos activos⁴.

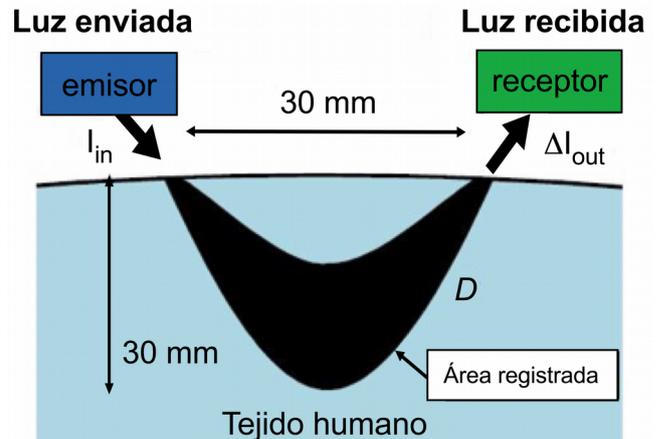


Figura 1. Funcionamiento de la espectroscopia de infrarrojo cercano para la detección de la saturación de oxígeno muscular.

La concentración de oxígeno es calculada por la ley de Lambert-Beer, aunque debido a que en el uso real existe una influencia de perturbaciones (aparición de movimiento fisiológico y luz exterior), la ley de Lambert-Beer se modifica para su aplicación como se muestra a continuación⁵:

$$\log (I_{in}/I_{out}) = \epsilon \cdot \Delta C \cdot D \cdot \Delta S$$

Donde I_{in} es la luz que entra hacia el músculo objetivo, I_{out} es el cambio de la luz transmitida que pasa a través del cuerpo, D (mm) es la distancia, ϵ [1/mM*mm] es el coeficiente de extinción, y ΔC [mM] (M: mol) es el cambio en la concentración, y ΔS el cambio en el efecto de dispersión.

En cuanto a los protocolos de colocación del dispositivo, en la gran mayoría de los estudios reportan que deben ser ubicados en la porción media del vientre muscular⁶⁻⁹. Otros estudios son más específicos situando el punto de colocación: (i) a 15 cm desde la grieta de la rótula en el vasto lateral del cuádriceps⁸, (ii) 10 cm del borde proximal de la rótula⁴ y (iii) línea media del músculo vasto lateral⁹. En el gastrocnemio, se indica colocarlo sobre el vientre derecho, paralelo al eje mayor de la espinilla¹⁰. Para evitar la contaminación de la señal lumínica, es necesario rasurar la zona de colocación⁹ y proteger el dispositivo con algún material oscuro (venda, malla compresiva o cinta elástica) de la luz ambiental⁸.

En definitiva, NIRS ha sido utilizado por gran número de investigadores para mostrar su viabilidad para medir el consumo de oxígeno (VO₂) en tejido muscular^{2,11,12}. Por lo tanto, diversas revisiones concluyen que esta metodología es válida para ello y puede ser muy prometedora para profundizar el conocimiento científico sobre la cinética de la saturación de oxígeno en tejido muscular¹²⁻¹⁴.

Ventajas del uso de la tecnología NIRS

Como hemos visto anteriormente, la tecnología NIRS presenta unas características de utilización que van a influir en la

consecución de los datos de forma válida y fiable. Las ventajas del uso de esta tecnología son:

- Es una técnica óptica no invasiva y segura que utiliza emisores de luz o diodos láser como fuente de luz y detectores NIRS para medir la oxigenación muscular³.
- La técnica espectroscópica NIR ofrece información acerca de los cambios de oxigenación producidos en la sangre venosa debido a la profundidad a la que llega esta señal en el tejido (en un adulto puede estar entre 4-5 centímetros). Del total de datos que esta capta un 70% provienen de sangre venosa, un 20% de sangre capilar y un 10% de sangre arterial¹.
- Permite realizar una monitorización de variables fisiológicas importantes¹⁵: oxihemoglobina (HbO₂), desoxihemoglobina (HHb), hemoglobina total (tHb) (tHb = HbO₂ + HHb) y saturación de oxígeno muscular (SmO₂ = HbO₂/tHb).
- Se caracteriza por una resolución temporal relativamente alta (típicamente entre 1 y 10 Hz) que permite medir el curso temporal de cambios de oxigenación muscular¹¹.
- Tiene un precio relativamente bajo, de pequeño tamaño, móvil, se puede fijar a cualquier parte del cuerpo y el análisis de sus datos puede realizarse a posteriori o de forma directa mediante tecnología inalámbrica de transmisión de datos²⁰.

Limitaciones del uso de la tecnología NIRS

La utilización de esta tecnología permite incrementar el conocimiento científico. Aun así, presenta las siguientes limitaciones y aspectos que debemos controlar en su registro:

- Acoplamiento óptico con la piel. Este contacto debe de ser estable para que la fuente de luz NIR de onda continua penetre en el tejido y se reciba la información de forma adecuada. La estratificación y el color de pelo oscuro atenúan la luz NIR¹⁶.
- La determinación de los parámetros de la espectroscopia NIR está influenciada por los cambios de flujo/volumen de la sangre a la piel¹.
- La señal de la espectroscopia NIR no se corrige automáticamente cuando se produce un movimiento del aparato de medición o una reducción de la penetración de la luz en la piel durante la monitorización¹¹.
- No existe una normalización en el procesamiento de los datos de la señal captada por la tecnología NIRS. Los fabricantes deberían marcar unas pautas para su análisis¹¹.
- Se precisan de estudios que aúnen conclusiones en cuanto a su fiabilidad inter-temporal que, a priori, se está reportando como débil⁹.

Aplicación de la tecnología NIRS en la actividad física y el deporte

La primera investigación que utilizó la tecnología NIRS para el estudio de la energía utilizada por el músculo humano en el deporte se realizó en un grupo de remeros entrenados en una simulación durante el entrenamiento de una prueba de 2000 m¹⁷. A partir de este estudio, muchos investigadores comenzaron a buscar aplicaciones de esta tecnología en el deporte entre las que destacamos la monitorización de la oxigenación muscular durante el entrenamiento y la competición, y la evaluación después de la aplicación de un programa de entrenamiento.

Control y monitorización de la saturación de oxígeno muscular en la actividad física y el deporte

La monitorización a nivel oxidativo mediante la tecnología NIRS se ha utilizado, sobre todo, en deportes individuales para determinar su efecto a través de dos variables: flujo sanguíneo y saturación de oxígeno muscular representadas por el incremento de la oxihemoglobina (HbO₂) y la desoxihemoglobina (HHb). En la tabla 1 se muestran las investigaciones que han utilizado esta tecnología por especialidad deportiva.

En carrera a pie encontramos dos investigaciones con resultados opuestos. En la primera de ellas encuentran diferencias oxidativas entre la pierna izquierda y la pierna derecha¹⁸ mientras que en la segunda no encuentran diferencias significativas¹⁹, siendo ambos protocolos esfuerzos de corta duración a alta intensidad. Por último, otra investigación realizada sobre el mismo deporte encuentra que la desoxigenación del vasto lateral contribuye al desarrollo del componente lento del VO₂ en carrera²⁰.

En ciclismo se han descrito (i) una mayor desoxigenación y una reoxigenación más rápida al comparar un test incremental máximo en relación a una contrarreloj de 20 km²¹; (ii) diferencias significativas en función del grado de entrenamiento y la cadencia de pedaleo en la oxigenación muscular²²; (iii) influencias del tipo de recuperación entre 2 test Wingate teniendo la recuperación pasiva mayor reoxigenación y mayor potencia pico²³ y (iv) el aumento de la reoxigenación periférica con el uso de entrenamiento de sprint interválico (SIT).

En esquí, dos investigaciones donde la primera de ellas no encuentra un mayor nivel de desoxigenación en el slalom gigante debido a una posición más baja del deportista²⁴. Por el contrario, otro trabajo realizado indica una mayor desoxigenación a un nivel de inclinación mayor, provocando una restricción del flujo sanguíneo²⁵. Esta investigación también encuentra una fuerte relación entre el porcentaje de desoxigenación y el VO₂ del organismo (r=0.83). En relación a la investigación realizada por Szmedra et al.²⁵, en patinaje de velocidad encontramos los mismos resultados⁶, añadiendo que existe una diferencia de oxigenación entre ambas piernas que se acentúa en las curvas por una mayor incidencia del peso sobre la pierna izquierda.

Con esta tecnología también se monitorizaron investigaciones en escalada²⁶ y fútbol²⁷. En escalada se encontró una mayor fuerza y una mejor reoxigenación en los flexores del dedo en los sujetos entrenados sobre los no entrenados, mientras que en fútbol el entrenamiento intermitente a alta intensidad (HIT), que requiere dicho deporte, provocó una mejora en la reoxigenación tras la realización de un test Wingate.

Uso de la tecnología NIRS para la evaluación de programas de entrenamiento de resistencia

Una de las diferentes utilidades del uso de la tecnología NIRS ha sido analizar la evolución a nivel oxidativo de la aplicación de diversos programas de entrenamiento y tapping. En la tabla 2 se exponen las investigaciones revisadas sobre esta temática.

Un programa de entrenamiento de intensidad baja y continua (END) provoca un mayor volumen sanguíneo y una mayor saturación de oxígeno muscular inicial²⁸. El protocolo END requiere de un alto volumen de entrenamiento con respecto al protocolo HIT (entrenamiento interválico de alta intensidad) (HIT: 180 min, END: 825 min)²⁹. Por tanto, una investigación analiza la aplicación de un protocolo END y un protocolo HIT, en dos grupos independientes, durante cuatro semanas. Los resultados exponen que ambos entrenamientos producen las mismas adaptaciones oxidativas y metabólicas, pero el protocolo HIT de forma más temprana²⁹. A partir de estos resultados, otra investigación analizó el efecto de ocho semanas de un programa de entrenamiento con sprints repetidos (RS)³⁰ obteniendo una mejor reoxigenación y un aumento de su consumo máximo de oxígeno (VO₂máx). Debido a las mejoras oxidativas de la utilización de los protocolos HIT²⁹ y RS³⁰, se realizó otra investigación mediante el método HIT encontrando un cambio en el perfil de desoxigenación muscular durante el ejercicio incremental, lo que sugiere una mejora en la extracción de O₂ durante el ejercicio³¹.

Por último, describimos una investigación con el objetivo de evaluar una fase de *tapping* tras un programa de entrenamiento. Para ello se diseñaron tres grupos de reducción de volumen de entrenamiento (30, 50 y 80%). Los resultados de esta investigación indican que los sujetos obtuvieron una mayor

Hb/MbO₂ muscular y un mayor rendimiento en el grupo de reducción del 50%. El grupo con reducción del 80% mejoró, pero no de forma significativa. Mientras que, el grupo que disminuyó un 30% tuvo una reducción del rendimiento tanto a nivel de potencia como a nivel oxidativo muscular³².

Aplicación de la tecnología NIRS durante el entrenamiento de fuerza

Las evidencias científicas reportadas de la utilización de la tecnología NIRS durante protocolos que utilicen principalmente el componente de la fuerza son bastante escasas. Solo se han encontrado cinco estudios que han usado esta tecnología para evaluar la cinética de oxigenación muscular en estas condiciones (tabla 3).

Tamaki et al.³³ monitorizó la oxigenación muscular del bíceps braquial durante un ejercicio de *curl* de bíceps observando un incremento de HHb y un descenso de HbO₂ y flujo total de hemoglobina al principio del ejercicio en un protocolo de 10 repeticiones máximas (RM), los autores sugieren que este tipo de ejercicios inducen una restricción en el flujo sanguíneo hacia el músculo efector produciendo una relativa falta de suministro de oxígeno. Por otro lado, Azuma et al.³⁴ concluyeron tras la monitorización del vasto lateral y el bíceps femoral mediante NIRS que: (i) existe un menor tiempo hasta fatiga según se produce un aumento de 1RM y (ii) la saturación de oxígeno fue inferior en el vasto lateral en relación al recto femoral, sugiriendo que dichas diferencias pueden estar relacionadas con la composición del tipo de fibra. Hoffman et al.³⁵ también analizaron el vasto lateral con diferentes grupos de intensidad y velocidad, entre los resultados encontraron: (i) niveles de reoxigenación similares en los dos grupos y (ii) mayor tiempo de reoxigenación en el grupo de baja intensidad, sugiriendo que ese retraso puede estar causado por un aumento en las concentraciones de lactato ya que fue significativamente mayor la respuesta hormonal en el grupo de baja intensidad. Tanimoto e Ishii³⁶ encontraron que la intensidad y la velocidad de ejecución influían significativamente en la SmO₂ siendo el grupo de menos intensidad y velocidad normal el que mayores valores de reoxigenación reportó. Bastida-Castillo et al.³⁷ comprobaron el efecto del tipo de recuperación sobre el comportamiento de la SmO₂ durante el entrenamiento de fuerza

mediante el ejercicio de sentadilla donde se encontraron diferencias significativas en el tiempo de recuperación de SmO₂ al realizar este de forma activa o pasiva, obteniendo mejores resultados de forma activa a baja intensidad.

Resulta evidente a partir de estos estudios, que la cinética de la oxigenación intramuscular y el volumen sanguíneo medidos por NIRS dependen de los protocolos de entrenamiento de fuerza y pueden variar en los diferentes músculos. Aunque esta técnica ha sido utilizada ampliamente durante ejercicios dinámicos, durante el entrenamiento de fuerza su aplicación es limitada. En este sentido, muchos aspectos relacionados con este tipo de ejercicio en humanos están por descubrir³⁸.

Conclusiones

Los estudios analizados demuestran que la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) es una técnica válida para la medición de la saturación de oxígeno muscular de forma no invasiva, económica y en tiempo real, debido a la emisión de los datos de forma inalámbrica. Entre sus diferentes aplicaciones encontramos la descripción de la cinética de oxidación muscular del ejercicio físico para la monitorización del entrenamiento y la competición tanto en contextos de resistencia como de fuerza. Aunque esta tecnología no ha sido ampliamente utilizada durante ejercicios de fuerza, parece interesante que se realicen investigaciones dedicadas a la oxigenación muscular en combinación con análisis bioquímico para comprobar qué ocurre con las diferentes cargas durante el entrenamiento de fuerza así como aumentar el entendimiento del entrenamiento sin oxígeno (anoxia). Sin embargo, en contextos de resistencia la tecnología NIRS ha sido muy útil para comprobar diferencias en la oxidación e intervenciones que mejoren la misma.

Estos dispositivos presentan un gran potencial en el análisis del rendimiento tanto en competición como en programas de entrenamiento gracias a la monitorización en tiempo real de deportistas, eliminando el uso de otras técnicas invasivas. Además, presentan protocolos de comunicación que pueden ser integrados en sistemas inerciales donde, con un solo sistema, se pueden monitorizar de forma continua durante largos periodos de tiempo diferentes variables para controlar el rendimiento deportivo.

Tabla 1. Investigaciones agrupadas por especialidad deportiva que utilizan la espectroscopia de infrarrojo cercano para evaluar la oxigenación muscular en el deporte.

Deporte	Prueba utilizada	Variable utilizada	Principales resultados	Autor
Atletismo	Sprints 100 m	ΔHb/MbO ₂	Diferencias de saturación de oxígeno entre ambas piernas en carrera	Quaresima et al. 1999
	9 circuitos cortos con cambios de dirección y sentido	ΔHHb, ΔtHb, ΔHbO ₂ , ΔTSI	No existen diferencias significativas a nivel oxidativo entre sujetos ni entre ambas piernas de cada uno de los sujetos	Jones, Hesford y Cooper. 2013
	Test 100% VO ₂ máx hasta la extenuación	BV, ΔHb/MbO ₂	La desoxigenación del vasto lateral contribuye al desarrollo del componente lento del VO ₂ en carrera	Demarie et al. 2001
Ciclismo	Simulación contrarreloj 20 km	BV, ΔHb/MbO ₂	Mayor desoxigenación y una reoxigenación más rápida en el test incremental máximo. Estas diferencias podrían deberse a diferencias en la temperatura muscular, el pH, el flujo sanguíneo localizado y los patrones de reclutamiento motor.	Neary et al. 2001
	Trabajo al 75% VO ₂ máx con distintas cadencias de pedaleo	BV, ΔHb/MbO ₂	Diferencias en oxigenación muscular en función del grado de entrenamiento de los sujetos y la cadencia de pedaleo.	Takaishi et al. 2002
	2 test Wingate (15-30s) con corta recuperación	ΔHHb, ΔHbO ₂	La recuperación pasiva obtuvo mayor reoxigenación y mayor potencia pico en el posterior test Wingate.	Dupont et al. 2007
	5 series SIT	ΔHb/MbO ₂ , %ODA, ΔtHb, ΔTSI	Aumenta la reoxigenación muscular periférica es un método efectivo de entrenamiento para atletas de élite	Jones et al. 2015
Esquí	Simulaciones de slalom y slalom gigante	BV, ΔHb/MbO ₂	La postura baja afecta al flujo sanguíneo, provocando alteraciones en ΔHb/MbO ₂ y en BV.	Szmedra et al. 2001
	Simulación esquí en tapiz - entrenamiento interválico	%ODA, BV	%ODA está relacionado con el comportamiento del VO ₂ de nuestro organismo. No existen diferencias en %ODA entre esquiar inclinado o de pie.	Im et al. 2001
Patínaje	Simulación 500 m	ΔtHb, ΔTSI, ΔHbO ₂ , BV	Decreció el volumen sanguíneo en ambas piernas igual en posición de sentado y se incrementó en la izquierda sobre la derecha en las curvas por la posición diferente de ambas piernas.	Hesford et al. 2012
Escalada	Prueba de MCV del flexor del dedo	BV, ΔHb/MbO ₂	En los escaladores se encontró una mayor fuerza y una mejor reoxigenación que en sujetos sanos no escaladores.	Philippe et al. 2012
Fútbol	Wingate de 30 seg.	BV, ΔHb/MbO ₂	Los sujetos no aumentan su potencia pico durante la temporada pero si mejoran el tiempo de reoxigenación de forma significativa.	Hoffman et al. 2005

BV: Volumen sanguíneo; ΔHbO₂: Cambios en la oxihemoglobina; %ODA: Cambios en la desaturación de oxígeno hemoglobina/mioglobina, ΔtHb: Cambios en la hemoglobina, ΔTSI: Índice de saturación de oxígeno en el tejido en tiempo real (expresado en %); VO₂máx: Consumo máximo de oxígeno; VO₂: Consumo de oxígeno; ΔHb/MbO₂: Cambios en la desoxigenación hemoglobina/mioglobina, ΔHHb: Cambios en la desoxihemoglobina, SIT: Entrenamiento interválico de sprints, MCV: Máxima contracción voluntaria.

Tabla 2. Investigaciones revisadas en las que se utiliza la espectroscopia de infrarrojo cercano para la evaluación de la oxigenación muscular a través de la aplicación de programas de entrenamiento y tapering.

Autor	Sujetos	Duración/Intensidad	Test de evaluación	Resultados
Costes et al. 2001	7 sujetos universitarios 5 hombres 2 mujeres	4 semanas (120 min x 6 días/semana; 70-80% FCmáx)	2 test submáximos de ciclismo al 50% y al 80% del VO ₂ máx	1. Incremento del volumen sanguíneo. 2. Mayor oxigenación tras el entrenamiento.
McKay et al. 2009	12 sujetos varones sanos	8 sesiones HIT (8-12 series 1', r=1'; 120% VO ₂ máx, recuperación pasiva) END (90-120 min.; 65% VO ₂ máx)	Test incremental máximo para determinar VO ₂ máx y estimar el umbral de lactato	1. Mejoras estadísticamente significativas en grupo HIT y END, no habiendo diferencias entre ambos. 2. Con entrenamiento HIT hubo evolución más rápida en el VO ₂ que en el grupo END.
Buchheit y Uffland. 2011	18 sujetos varones entrenados	8 semanas, 2 días/semana 1. Intervalos cortos (90-115% VAM) 2. Ejercicio de baja intensidad (40-60 min; 70-75% VAM).	1. Tiempo 10 km. 2. Test VAM 3. 2x(1x15"all-out), r=15"	1. Mejoran el tiempo en 10 km. 2. Mejoran su VAM 3. Mejor reoxigenación entre las 2 series de 15 segundos all-out.
Prieur y Mucci. 2013	11 sujetos varones no entrenados	6 semanas, 3 días/semana 3x(6x30", 120% VAM; r=30" pasiva)	Test incremental máximo en carrera (Test VAM).	1. Cambia el perfil de desoxigenación muscular durante el ejercicio incremental, lo que sugiere una mejora en la extracción de O ₂ . 2. No reducir la heterogeneidad espacial de desoxigenación muscular y el volumen de sangre durante el ejercicio.
Hirano et al. 2015	16 varones sanos	2 semanas, 5 días/semana (60 min; 100%ULA) con 3 cadencias de pedaleo (35, 50, 75 rpm)	Test incremental máximo para determinar VO ₂ máx y estimar el umbral de lactato	1. Influencia en la oxigenación periférica en función de la cadencia de pedaleo.
Neary et al. 2005	11 sujetos varones ciclistas entrenados	1 semana tapering 3 grupos de reducción de volumen del entrenamiento (30%, 50%, 80%).	Test de 20 km	1. Reducción del 30%: No mejora el rendimiento ni mejora a nivel oxidativo. 2. Reducción del 50%: Mejoras significativas en el rendimiento y a nivel oxidativo. 3. Reducción del 80%: Mejoras en el rendimiento y a nivel oxidativo, pero no son estadísticamente significativas.

FCmáx: Frecuencia cardiaca máxima; VO₂máx: Consumo máximo de oxígeno; VO₂: Consumo de oxígeno; VAM: Velocidad Aeróbica Máxima; HIT: Entrenamiento de Alta Intensidad; END: Entrenamiento de moderada/baja intensidad; O₂: Oxígeno; ULA: Umbral Láctico.

Tabla 3. Investigaciones agrupadas por ejercicios que utilizan la espectroscopia de infrarrojo cercano para la evaluación de la oxigenación muscular durante el entrenamiento de fuerza.

Ejercicio (músculo)	Carga	Variable utilizada	Principales resultados	Autor
Curl de bíceps (bíceps)	10 repeticiones sin carga, 10 repeticiones máximas con 3" de descanso y 3 series de 5 repeticiones con 1' de descanso	BV, ΔHbO ₂ , ΔtHb	Se observó un incremento de HHb y un descenso de HbO ₂ , así como un descenso del flujo total al principio del ejercicio hasta recuperarse los niveles basales al final de todos los valores	Tamaki et al. 1994
Extensión de cuádriceps (vasto lateral y recto femoral)	20%, 30% y 40% del 1RM realizando 60 repeticiones por minuto hasta llegar a la fatiga	BV, ΔHbO ₂ , ΔtHb	El punto de fatiga, en las diferentes intensidades, en el recto femoral no fue estadísticamente significativo. Se sugirió que las diferencias entre estos dos músculos pueden estar relacionadas con el tipo de fibra en su composición	Azuma et al. 2000
	LS: baja intensidad y baja velocidad. 8 repeticiones (50% 1RM) 3" repeticiones HN: alta intensidad y velocidad normal. 8 repeticiones (80% 1RM) 1" repeticiones LN: baja intensidad y velocidad normal. 8 repeticiones (50% 1RM) 1" repeticiones	BV, ΔHbO ₂ , ΔtHb	El grupo LS mostró menos oxigenación que los otros dos grupos y LS y HN fueron significativamente mayores en reoxigenación respecto a LN	Tanimoto et al. 2005
Sentadilla (vasto lateral, recto anterior)	B: 4 series de 15 repeticiones al 60% 1RM A: 4 series de 4 repeticiones al 90% 1RM	BV, ΔHbO ₂ , %ODA, ΔtHb	Aunque los niveles de reoxigenación fueron similares en los dos grupos, hubo un retraso significativamente más largo antes de la reoxigenación en el grupo de baja intensidad. Los autores sugirieron que ese retraso puede estar causado por un aumento en las concentraciones de lactato	Hoffman et al. 2003
	GC: 4 series de 10 repeticiones (65% 1RM) 2' de descanso pasivo GA: 4 series de 10 repeticiones (65% 1RM) descanso activo hasta estabilización de oxígeno GP: 4 series de 10 repeticiones (65% 1RM) descanso pasivo hasta estabilización de oxígeno	BV, ΔHbO ₂ , %ODA, ΔtHb	Los autores sostienen que se produce una mejor recuperación entre series a nivel oxidativo cuando los sujetos realizan una recuperación de forma activa en comparación con la pasiva.	Bastida-Castillo et al. 2016

BV: Volumen sanguíneo; ΔHbO₂: Cambio en la oxigenación; %ODA: Cambios en la desaturación de oxígeno hemoglobina/mioglobina; ΔtHb: Cambios en la hemoglobina; HHb: Desoxihemoglobina; HbO₂: Oxihemoglobina; 1RM: 1 repetición máxima; LS: Grupo baja intensidad y baja velocidad; HN: Grupo alta intensidad y velocidad normal; LN: Grupo baja intensidad y velocidad normal; B: Grupo bajo porcentaje del 1RM; A: Grupo alto porcentaje del 1RM; GC: Grupo control; GA: Grupo recuperación activa; GP: Grupo recuperación pasiva.

Autoría. Todos los autores han contribuido intelectualmente en el desarrollo del trabajo, asumen la responsabilidad de los contenidos y, asimismo, están de acuerdo con la versión definitiva del artículo. **Conflicto de intereses.** Los autores declaran no tener conflicto de intereses. **Origen y revisión.** Se ha realizado por encargo, la revisión ha sido externa y por pares. **Responsabilidades éticas.** Protección de personas y animales: Los autores declaran que los procedimientos seguidos están conforme a las normas éticas de la Asociación Médica Mundial y la Declaración de Helsinki. **Confidencialidad:** Los autores declaran que han seguido los protocolos establecidos por sus respectivos centros para acceder a los datos de las historias clínicas para poder realizar este tipo de publicación con el objeto de realizar una investigación/divulgación para la comunidad. **Privacidad:** Los autores declaran que no aparecen datos de los pacientes en este artículo.

Bibliografía

- Ferrari M, Quaresima V. Review: Near infrared brain and muscle oximetry: from the discovery to current applications. J Infrared Spectrosc. 2012;20(1):1-14.
- Ferrari M, Muthalib M, Quaresima V. The use of near-infrared spectroscopy in understanding skeletal muscle physiology: recent developments. Philos Trans A Math Phys Eng Sci. 2011;369(1955):4577-90.
- Jöbsis FF. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. Science. 1977;198(4334):1264-7.
- Cornachione K, McLaren J, Heil DP. Use of a wireless NIRS monitor to track changes in muscle oxygenation for laboratory-based Nordic skiing test protocol. VI Congress on Science and Skiing. St. Christoph am Arlberg: 14-19 de diciembre de 2013.
- Muramatsu Y, Kobayashi H. Assessment of local muscle fatigue by NIRS-development and evaluation of muscle suit. Robomech J. 2014;1(1):1-19.
- Hesford CM, Laing SJ, Cardinale M, Cooper CE. Asymmetry of quadriceps muscle oxygenation during elite short-track speed skating. Med Sci Sports Exerc. 2012;44(3):501-8.
- Oueslati F, Boone J, Ahmadi S. Respiratory muscle endurance, oxygen saturation index in vastus lateralis and performance during heavy exercise. Respir Physiol Neurobiol. 2016;227(1):41-7.
- Scott BR, Slattery KM, Sculley DV, Lockie RG, Dascombe BJ. Reliability of telemetric electromyography and near-infrared spectroscopy during high-intensity resistance exercise. J Electromyogr Kinesiol. 2014;24(5):722-30.
- Xu G, Mao Z, Ye Y, Lv K. Relationship between muscle oxygenation by NIRS and blood lactate. J Phys Conf. 2011;277(1):1-13.
- Bringard A, Denis R, Belluye N, Perrey S. Effects of compression tights on calf muscle oxygenation and venous pooling during quiet resting in supine and standing positions. J Sports Med Phys Fitness. 2006;46(4):548-54.
- Ferrari M, Mottola L, Quaresima V. Principles, techniques, and limitations of near infrared spectroscopy. Can J Appl Physiol. 2004;29(4):463-87.

12. Pereira MI, Gomes PS, Bhambhani YN. A brief review of the use of near infrared spectroscopy with particular interest in resistance exercise. *Sports Med.* 2007;37(7):615-24.
13. Scheeren TW, Schober P, Schwarte LA. Monitoring tissue oxygenation by near infrared spectroscopy (NIRS): background and current applications. *J Clin Monit Comput.* 2012;26(4):279-87.
14. Sako T, Hamaoka T, Higuchi H, Kurosawa Y, Katsumura T. Validity of NIR spectroscopy for quantitatively measuring muscle oxidative metabolic rate in exercise. *J Appl Physiol.* 2001;90(1):338-44.
15. Hamaoka T, McCully KK, Quaresima V, Yamamoto K, Chance B. Near-infrared spectroscopy/imaging for monitoring muscle oxygenation and oxidative metabolism in healthy and diseased humans. *J Biomed Opt.* 2007;12(6):062105.
16. Wahr JA, Tremper KK, Samra S, Delpy DT. Near-infrared spectroscopy: theory and applications. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 1996;10(3):406-18.
17. Chance B, Dait MT, Zhang C, Hamaoka T, Hagerman F. Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers. *Am J Physiol.* 1992;262(3 Pt 1):C766-75.
18. Quaresima V, Ferrari M, Ciabattini M, Canto U, Colonna R. Oxygenation kinetics of different leg muscle groups measured during a 100-m sprint run by a portable near-infrared photometer. *Ital J Sport Sci.* 1999;6(1):20-3.
19. Jones B, Hesford CM, Cooper CE. The Use of Portable NIRS to Measure Muscle Oxygenation and Haemodynamics During a Repeated Sprint Running Test. En: Van Huffel S, Naulaers G, Caicedo A, Bruley DE, Harrison DK, editores. *Oxygen Transport to Tissue XXXV.* New York, NY: Springer New York; 2013; p. 185-91.
20. Demarie S, Quaresima V, Ferrari M, Sardella F, Billat V, Faina M. VO₂ slow component correlates with vastus lateralis deoxygenation and blood lactate accumulation during running. *J Sports Med Phys Fitness.* 2001;41(4):448-55.
21. Neary JP, Hall K, Bhambhani YN. Vastus medialis muscle oxygenation trends during a simulated 20-km cycle time trial. *Eur J Appl Physiol.* 2001;85(5):427-33.
22. Takaiishi T, Ishida K, Katayama K, Yamazaki K, Yamamoto T, Moritani T. Effect of cycling experience and pedal cadence on the near-infrared spectroscopy parameters. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34(12):2062-71.
23. Dupont G, Moalla W, Matran R, Berthoin S. Effect of short recovery intensities on the performance during two Wingate tests. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(7):1170-6.
24. Im J, Nioka S, Chance B, Rundell KW. Muscle oxygen desaturation is related to whole body VO₂ during cross-country ski skating. *Int J Sports Med.* 2001;22(5):356-60.
25. Szmedra L, Im J, Nioka S, Chance B, Rundell KW. Hemoglobin/myoglobin oxygen desaturation during Alpine skiing. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33(2):232-6.
26. Philippe M, Wegst D, Müller T, Raschner C, Burtscher M. Climbing-specific finger flexor performance and forearm muscle oxygenation in elite male and female sport climbers. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112(8):2839-47.
27. Hoffman JR, Im J, Kang J, Ratamess NA, Nioka S, Rundell KW, et al. The effect of a competitive collegiate football season on power performance and muscle oxygen recovery kinetics. *J Strength Cond Res.* 2005;19(3):509-13.
28. Costes F, Prieur F, Féasson L, Geyssant A, Barthélémy JC, Denis C. Influence of training on NIRS muscle oxygen saturation during submaximal exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33(9):1484-9.
29. McKay BR, Paterson DH, Kowalchuk JM. Effect of short-term high-intensity interval training vs. continuous training on O₂ uptake kinetics, muscle deoxygenation, and exercise performance. *J Appl Physiol.* 2009;107(1):128-38.
30. Buchheit M, Ufland P. Effect of endurance training on performance and muscle reoxygenation rate during repeated-sprint running. *Eur J Appl Physiol.* 2011;111(2):293-301.
31. Prieur F, Mucci P. Effect of high-intensity interval training on the profile of muscle deoxygenation heterogeneity during incremental exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2013;113(1):249-57.
32. Neary JP, McKenzie DC, Bhambhani YN. Muscle oxygenation trends after tapering in trained cyclists. *Dyn Med.* 2005;4(1):4.
33. Tamaki T, Uchiyama S, Tamura T, Nakano S. Changes in muscle oxygenation during weight-lifting exercise. *Eur J Appl Physiol.* 1994;68(6):465-9.
34. Azuma K, Homma S, Kagaya A. Oxygen supply-consumption balance in the thigh muscles during exhausting knee-extension exercise. *J Biomed Opt.* 2000;5(1):97-101.
35. Hoffman JR, Im J, Rundell KW, Kang J, Nioka S, Speiring BA, et al. Effect of muscle oxygenation during resistance exercise on anabolic hormone response. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35(11):1929-34.
36. Tanimoto M, Ishii N. Effects of low-intensity resistance exercise with slow movement and tonic force generation on muscular function in young men. *J Appl Physiol* (1985). 2006;100(4):1150-7.
37. Bastida-Castillo A, Gómez-Carmona CD, Pino-Ortega J. Efecto del tipo de recuperación sobre la oxigenación muscular durante el ejercicio de sentadilla. *Kronos.* 2016;15(2):1-12.
38. González Badillo JJ, Ribas Serna J. Bases de la programación del entrenamiento de fuerza. Barcelona: INDE Publicaciones; 2002.