

PROGRAMA DE DOCTORADO EN BIOMEDICINA

**EFFECTOS DEL ENTRENAMIENTO DE FUERZA
MUSCULAR SOBRE EL GASTO ENERGÉTICO,
FATIGA Y BIOMARCADORES DE ACTIVIDAD
FÍSICA EN ADULTOS SANOS.**



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

Claudia De los Ángeles Miranda Fuentes



Programa de Doctorado en Biomedicina

Departamento de Educación Física y Deportiva
Facultad de Ciencias del Deporte
Universidad de Granada

Efectos del entrenamiento de fuerza muscular sobre el gasto energético, fatiga y biomarcadores de actividad física en adultos sanos.

Claudia De los Ángeles Miranda Fuentes

2021

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Claudia de los Ángeles Miranda Fuentes
ISBN: 978-84-1117-183-0
URI: <http://hdl.handle.net/10481/72070>

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Dedicatoria

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

A mis padres Mireya y Juan por los valores que me han enseñado,
por el amor y apoyo incansable en cada paso de mi vida;
porque siempre serán para mi, el máximo ejemplo a seguir en la vida.

A mi hermano Juan, porque te admiro desde el primer día de vida
y eres mi gran compañero en todos mis caminos.

A mis sobrinos y ahijadas Mateo, Julieta y Josefina
porque sus acciones, emociones y expresiones iluminan con alegría mi vida.

C. Miranda-Fuentes

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Agradecimientos

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Agradecimientos

- A Daniel por su amistad y apoyo, por ser un profesional y líder auténtico, humilde, generoso; porque compartimos la ilusión en la investigación y la idea que *no vales por el título que tengas, sino por lo que eres capaz de hacer con lo que eres y sabes*. Por tanto... ¡muchas gracias, Dani!
- A Luis Javier Chiroso Ríos “Luja”, por confiar en mi y aceptarme bajo su guía y docencia; por su alegría, amistad, generosidad, por sus consejos, porque admiro y me siendo agradecida de coincidir y trabajar con personas que comparten mis valores; sin su forma única de liderar la manada, nada de esto sería posible. ¡gracias Luja!
- A Andrés, por su paciencia infinita con mi gusto por lo que hago; por su amor, motivación y por buscar siempre su mejor versión para acompañar mis momentos difíciles; por su apoyo constante en todas mis decisiones.
- A mis amigos, por sus palabras de ánimo, de éxitos y alegrías por el proceso vivido y por lo que vendrá.
- A Luis Gómez, por su gran apoyo y orientación en los momentos difíciles.
- A la Universidad Andrés Bello, especialmente a la Facultad de Ciencias de la Rehabilitación, carrera de Kinesiología, por brindarme herramientas fundamentales para alcanzar este objetivo.
- A la Universidad de Granada, por aceptarme en el programa de Doctorado, especialmente a todos los miembros del grupo IDAFISAD CTS 642 y a la Red Pleokinetic.

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Índice

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Tabla de contenido

1. ÍNDICE DE TABLAS	21
2. ÍNDICE DE FIGURAS	25
3. LISTADO DE ABREVIATURAS	29
4. RESUMEN	33
5. ABSTRACT OF THE THESIS	38
6. INTRODUCCIÓN	43
7. MARCO CONCEPTUAL	47
7.1.1 MÚSCULO ESQUELÉTICO	47
7.1.2 SUMINISTRO DE SANGRE AL MÚSCULO ESQUELÉTICO	47
7.2 METABOLISMO ENERGÉTICO Y EJERCICIO	50
7.3 FUERZA MUSCULAR	51
7.3.1 TIPOS DE CONTRACCIONES MUSCULARES	52
7.3.2 EVALUACIÓN DE FUERZA MUSCULAR Y SUS MANIFESTACIONES.	54
7.3.3 DINAMOMETRÍA ELECTROMECAÁNICA FUNCIONAL	56
7.3.4 FUERZA MUSCULAR PARA LA SALUD Y EL RENDIMIENTO FÍSICO	57
7.4 ENTRENAMIENTO DE LA FUERZA MUSCULAR	60
7.4.1 RESPUESTA FISIOLÓGICA AL ENTRENAMIENTO DE FUERZA MUSCULAR	64
7.5 FATIGA MUSCULAR	65
7.5.1 FATIGA MUSCULAR, RENDIMIENTO FÍSICO Y SOBREENTRENAMIENTO	66
7.6 BIOMARCADORES METABÓLICOS Y PRESCRIPCIÓN DE EJERCICIO	67
7.6.1 TIPOS DE BIOMARCADORES EMPLEADOS EN EJERCICIO Y DEPORTE	68
7.6.2 BIOMARCADORES DEL ESTADO MUSCULAR	69
7.7 OXIMETRÍA MUSCULAR	70
7.7.1 FISIOLÓGICA DE LA MIOGLOBINA Y HEMOGLOBINA	70
7.7.2 USO DE LA TECNOLOGÍA NIRS EN OXIMETRÍA MUSCULAR.	71
7.7.3 NIRS Y EJERCICIO FÍSICO.	76
7.7.4 NIRS Y OXIMETRÍA MUSCULAR COMO RESPUESTA AL EJERCICIO.	78
7.7.5 FORTALEZAS Y LIMITACIONES DEL USO DE NIRS EN EJERCICIO FÍSICO.	80
8. APROXIMACIÓN AL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	85
9. OBJETIVO GENERAL	90
10. HIPÓTESIS	93

11. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	97
11.1 TIPOS DE ESTUDIOS	97
11.2 DISEÑO METODOLÓGICO	97
11.3 PROCEDIMIENTOS	101
11.4 EQUIPAMIENTO	104
11.5 EXTRACCIÓN DE DATOS	104
11.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	105
12. RESULTADOS	110
12.1 RESULTADOS E1	110
12.2 RESULTADOS E2	113
12.3 RESULTADOS E3	118
13. DISCUSIÓN	123
13.1 DISCUSIÓN E1	123
13.2 DISCUSIÓN E2	127
13.3 DISCUSIÓN E3	129
14. CONCLUSIONES	136
15. LIMITACIONES DEL ESTUDIO	140
16. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	144
17. BIBLIOGRAFÍA	147
18. ANEXOS	177
18.1 ANEXO 1: QUALITY ASSESSMENT BASED ON MODIFIED DOWNS AND BLACK CHECKLIST	177
18.2 ANEXO 2: CERTIFICADO COMITÉ DE ÉTICA UNIVERSIDAD DE GRANADA.	178

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Índice de tablas

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

1. ÍNDICE DE TABLAS

Nº tabla	Título	Pág.
Tabla 1	Características de NIRS comerciales utilizados en artículos de ciencias del deporte.	77
Tabla 2	Detalle de tipo de estudio.	97
Tabla 3	Términos de búsqueda y palabras clave utilizadas en cada búsqueda en base de datos. Las búsquedas 1 y 2 se combinaron mediante "AND".	98
Tabla 4	Evaluación de la calidad metodológica basada en la lista de verificación Downs y Black modificada.	110
Tabla 5	Características de los participantes de los estudios seleccionados para la revisión.	111
Tabla 6	Resumen de los resultados de los estudios que investigan la saturación de oxígeno muscular antes y después del ejercicio de fuerza muscular.	112
Tabla 7	Comparación de la carga promedio, la carga máxima y el número de repeticiones durante las condiciones de fuerza isométrica y dinámica.	113
Tabla 8	Fiabilidad de Humon Hex NIRS para la determinación de SmO ₂ y Hgb en reposo, protocolos de fuerza isométrica y dinámica.	116
Tabla 9	Comportamiento de SmO ₂ , Hgb y fuerza durante todos los protocolos de ejercicio.	118
Tabla 10	Análisis post-hoc de Bonferroni para concentración de hemoglobina.	119

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Índice de figuras

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Nº figura	Título	Pág.
Figura 1	Ejemplificación ilustrada de la Ley de Lamber-Beer en un tejido vivo.	72
Figura 2	1ª Ecuación de la ley de Lamber-Beer.	73
Figura 3	2ª Ecuación de la ley de Lamber-Beer modificada.	73
Figura 4	Ejemplificación ilustrada del funcionamiento y reflexión de luz de los dispositivos NIRS.	75
Figura 5	Representación gráfica de la sesión experimental del proyecto de investigación.	102
Figura 6	Representación gráfica del posicionamiento del NIRS y DEMF.	103
Figura 7	Resumen estrategia de búsqueda y el proceso de selección de estudios.	111
Figura 8	Comportamiento de SmO_2 y Hgb en un individuo representativo en reposo y durante condiciones de fuerza isométrica y fuerza dinámica.	113
Figura 9	Gráficos de Bland-Altman test-retest.	115
Figura 10	Relación entre SmO_2 y Hgb en reposo y durante las condiciones de fuerza isométrica y fuerza dinámica.	117
Figura 11	Diferencias de SmO_2 entre los protocolos de reposo y fuerza muscular.	119

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Listado de abreviaturas

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

3. LISTADO DE ABREVIATURAS

OMS	Organización Mundial de la Salud.
ACSM	Colegio Americano de Medicina del deporte.
HbO ₂	Oxihemoglobina.
HHb	Desoxihemoglobina.
Mb	Mioglobina.
Hb	Hemoglobina.
tHb	Hemoglobina total.
NIRS	Espectral del infrarrojo cercano.
FEMD	Dinamómetro electromecánico funcional.
Hgb	Concentración de hemoglobina.
VL	Vasto lateral.
ATP	Adenosin trifosfato.
ADP	Adenosin difosfato.
O ₂	Oxígeno.
VO ₂	Consumo de oxígeno.
VO ₂ max	Consumo de oxígeno máximo.
PCO ₂ ,	Presión arterial de dióxido de carbono.
DEMF	Dinamómetro electromecánico funcional.
AHA	Asociación Americana del Corazón.
RM	Repetición máxima.
App	Aproximadamente.

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Resumen

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

4. RESUMEN

Introducción: El entrenamiento de fuerza muscular es una intervención con sólida base científica sobre los beneficios en la condición de salud de la población, es por esto por lo que la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda la práctica de este ejercicio a lo menos dos veces por semana. En este sentido, el conocimiento y utilización de biomarcadores como indicador objetivo del estado y trabajo muscular, resulta relevante para el manejo y/o progresión de la repuesta del músculo esquelético a los determinantes de la carga de trabajo. Hoy en día, se ha reconocido el uso de la oximetría muscular como un biomarcador de la actividad muscular través de la lectura de oxihemoglobina (HbO_2) y desoxihemoglobina (HHb) expresados, principalmente, en saturación de oxígeno muscular (SmO_2) en sangre con el uso de espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS).

Objetivo: La tesis doctoral tiene como objetivo general determinar los efectos del entrenamiento de fuerza muscular sobre el gasto energético, fatiga y biomarcadores de actividad física en adultos sanos. En esta primera lectura de productos de este proyecto, sólo serán entregados los resultados que responden al efecto del entrenamiento de fuerza muscular sobre biomarcadores de actividad física en adultos sanos; en este caso, el biomarcador analizado será la oximetría muscular evaluada con NIRS. Lo anterior llevó a plantear tres objetivos específicos: (i) informar los valores de referencia iniciales y finales de oximetría muscular obtenidos por NIRS durante el entrenamiento de fuerza en adultos sanos; (ii) determinar la confiabilidad de un dispositivo NIRS para calcular los valores de oximetría en reposo y durante las actividades de fuerza y (iii) describir y comparar la respuesta aguda de la oximetría muscular durante protocolos de ejercicio de fuerza muscular; cada uno de estos objetivos específicos corresponde a un estudio (E).

Metodología: Se realizaron, E1: revisión sistemática; E2 y E3 estudios de tipo descriptivos transversales. Para los estudios E2 y E3 participaron voluntariamente dieciséis hombres sanos (media (me) \pm desviación estándar (DE): edad = 36.12 ± 6.39

años; masa corporal = 80.37 ± 10.03 kg; altura corporal = 1.73 ± 0.06 m; índice de masa corporal = 26.65 ± 2.73 kg/m²; porcentaje de grasa corporal = 23.45 ± 4.85 %; masa de músculo esquelético = 34.97 ± 3.69 kg y masa de músculo esquelético del miembro inferior = 18.64 ± 2.17 kg). Las principales variables evaluadas fueron fuerza muscular isométrica y dinámica utilizando un dinamómetro electromecánico funcional (DEMF) y oximetría muscular con un NIRS inalámbrico.

Resultados: (E1) La SmO₂ se presenta como el biomarcador de oximetría muscular más estudiado con dispositivos NIRS, mostrando que disminuye como respuesta aguda al ejercicio de fuerza muscular, encontrándose resultados antes del protocolo de fuerza entre (rango = 68.07-77.9%), y posterior (rango = 9.50- 46.09%). E2: El dispositivo NIRS (Humon Hex) es fiable en condiciones de reposo (CV = 5.76%, SEM = 3.81, ICC = 0.90) e isometría (CV = 3.03%, SEM = 2.08, ICC = 0.92) y se vuelve menos fiable al aumentar la intensidad y la fuerza muscular (dinámica). (E3) (i) se observaron niveles mínimos de SmO₂ (66.31 ± 9.38 %) y Hgb (12.22 ± 0.55 g/dL) durante P2, (ii) no se encontraron diferencias significativas entre las cargas medias de los respectivos protocolos para SmO₂ y (iii) la Hgb muscular difirió significativamente entre el reposo y P1 y el reposo y P3.

Conclusión: Al finalizar la realización de esta tesis doctoral se puede concluir que, tras una revisión sistemática, la tendencia de SmO₂ es a disminuir después de un protocolo de fuerza muscular. Por otra parte, el dispositivo Humon Hex es un instrumento fiable para medir cambios en las características locales del oxígeno en el musculo, sin embargo, pierde confiabilidad en ejercicios de fuerza dinámica. Finalmente, ejercicios de intensidad creciente y corta duración no modifican significativamente la SmO₂ (%), sin embargo, la Hgb se ve significativamente incrementada respecto al reposo en protocolos de fuerza isométrica y dinámica, demostrando ser una posible herramienta de discriminación de cargas de trabajo para protocolos de fuerza muscular.

Palabras claves: entrenamiento de fuerza; dinamómetro; saturación oxígeno muscular; hemoglobina.

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Abstract of the thesis

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

5. ABSTRACT OF THE THESIS

Introduction: Muscle strength training is an intervention with a solid scientific basis on the benefits in the population's health condition. That is why the World Health Organization (WHO) recommends practicing this exercise at least biweekly. In this sense, the knowledge and use of biomarkers as an objective indicator of muscle status, whether acute or chronic, is relevant for the skeletal muscle response's management and / or progression to the determinants of workload. Today, the use of muscle oximetry as a biomarker of muscle activity has been recognized through the reading of oxyhemoglobin (HbO₂) and deoxyhemoglobin (HHb) chromophores in blood with the use of near infrared spectroscopy (NIRS).

Objective: The general objective of the doctoral thesis is to determine the effects of muscle strength training on energy expenditure, fatigue and biomarkers of physical activity in healthy adults. In this first reading of the products of the doctoral research project, only the results that respond to the effect of muscle strength training on biomarkers of physical activity in healthy adults will be delivered; in this case, the biomarker analyzed will be muscle oximetry evaluated with NIRS. This led to three specific objectives: (i) to report the initial and final reference values of muscle oximetry obtained by NIRS during strength training in healthy adults; (ii) determine the reliability of a NIRS device to calculate oximetry values at rest and during strength activities and (iii) describe and compare the acute response of muscle oximetry during muscle strength exercise protocols; each of these specific objectives corresponds to a study (E).

Methodology: To respond to the general objective, 3 specific objectives (studies) are proposed: E1: systematic review; E2 and E3 descriptive cross-sectional studies. For the last two studies, sixteen healthy men voluntarily participated (mean \pm standard deviation (SD): age = 36.12 \pm 6.39 years; body mass = 80.37 \pm 10.03 kg; body height = 1.73 \pm 0.06 m; body mass index = 26.65 \pm 2.73 kg / m²; body fat percentage = 23.45 \pm 4.85%; skeletal muscle mass = 34.97 \pm 3.69 kg and lower limb skeletal muscle mass =

18.64 ± 2.17 kg). The main variables evaluated were isometric and dynamic muscle strength using a functional electromechanical dynamometer (DEMF) and muscle oximetry with a wireless NIRS.

Results: (E1) SmO₂ is the most studied muscle oximetry biomarker with NIRS devices, showing that it decreases as an acute response to muscle strength exercise, finding results before the strength protocol between (range = 68.07-77.9%), and later (range = 9.50– 46.09%). (E2) The NIRS device (Humon Hex) is reliable in resting conditions (CV = 5.76%, SEM = 3.81, ICC = 0.90) and isometry (CV = 3.03%, SEM = 2.08, ICC = 0.92) and becomes less reliable by increasing intensity and muscle strength (dynamic). (E3) (i) minimal levels of SmO₂ (66.31 ± 9.38%) and Hgb (12.22 ± 0.55 g/dL) were observed during P2, (ii) no significant differences were found between the mean loads of the respective protocols for SmO₂ and (iii) muscle Hgb differed significantly between rest and P1 and rest and P3.

Conclusion: At the end of this doctoral thesis, after a systematic review, it can be concluded that SmO₂ tends to decrease after a muscle strength protocol. On the other hand, the Humon Hex device is a reliable instrument to measure changes in the local characteristics of oxygen in muscle hemoglobin, being unreliable for more dynamic exercises. Finally, exercises of increasing intensity and short duration do not significantly modify SmO₂ (%). However, Hgb is significantly increased compared to rest in isometric and dynamic strength protocols, proving to be a possible workload discrimination tool for muscle strength protocols.

Keywords: strength training; dynamometer; muscle oxygen saturation; hemoglobin.

Introducción

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

6. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, uno de cada cuatro adultos no tiene un nivel suficiente de actividad física, situación que resulta preocupante pues esta variable es considerada el cuarto factor de riesgo de mortalidad y uno de los principales factores de riesgo para desarrollar enfermedades no transmisibles. El entrenamiento de fuerza muscular es una intervención con sólida base científica sobre los beneficios en la condición de salud de la población, es por esto que la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda la práctica de este ejercicio a lo menos dos veces por semana, y el Colegio Americano de Medicina del deporte (ACSM) sugiere que se practique de manera progresiva de dos a tres días por semana para personas sanas, incluyendo al menos una serie de ocho a diez ejercicios que se enfoquen en los principales grupos musculares.

Al ser el entrenamiento de fuerza muscular una práctica recomendada para la salud, cada hallazgo científico que se logre aportar sobre su funcionamiento metabólico y fisiológico resulta relevante para su prescripción tanto en fitness como en rehabilitación. En este sentido, el conocimiento y utilización de biomarcadores (o marcadores biológicos) como indicador objetivo del estado muscular resulta relevante para el manejo y/o progresión de la repuesta del músculo esquelético a los determinantes de la carga de trabajo impuesta, y será en base al abordaje de un importante biomarcador que expondremos los resultados alcanzados en esta investigación doctoral. En este sentido, existen varios biomarcadores utilizados para monitorear el rendimiento físico de un sujeto como respuesta al entrenamiento de fuerza muscular, sin embargo, a pesar de la gran utilidad reportada de ellos en la literatura, muchos no pueden ser usados de manera masiva y funcional durante el ejercicio debido al alto costo en su acceso.

Hoy en día, se ha reconocido el uso de la oximetría muscular como un biomarcador de la actividad muscular través de la lectura de cromóforos de oxihemoglobina (HbO_2) y desoxihemoglobina (HHb) en sangre utilizando espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS), cuyos resultados parecen una excelente alternativa para el manejo del

rendimiento físico en ejercicios de fuerza, es por esto que aportar con nuevo conocimiento respecto de este innovador marcador biológico resulta interesante para contar con una herramienta accesible y funcional para el control e interpretación de esta variable con el objetivo de optimizar el rendimiento del deportista.

La presente investigación tiene como objetivo general determinar los efectos del entrenamiento de fuerza muscular sobre el gasto energético, fatiga y biomarcadores de actividad física en adultos sanos. Lo anterior llevó a plantear tres objetivos específicos: (i) informar los valores de referencia iniciales y finales de oximetría muscular obtenidos por NIRS durante el entrenamiento de fuerza en adultos sanos; (ii) determinar la confiabilidad de un dispositivo NIRS para calcular los valores de oximetría en reposo y durante las actividades de fuerza y (iii) describir y comparar la respuesta aguda de la oximetría muscular durante protocolos de ejercicio de fuerza muscular; cada uno de estos objetivos específicos corresponde a un estudio (E). En esta primera entrega de resultados del proyecto de investigación doctoral propuesto, sólo serán revisados los resultados que responden al efecto del entrenamiento de fuerza muscular sobre biomarcadores de actividad física en adultos sanos; en este caso el biomarcador analizado será la oximetría muscular evaluada con NIRS.

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Marco conceptual

7. MARCO CONCEPTUAL

7.1.1 MÚSCULO ESQUELÉTICO

El músculo esquelético es uno de los tejidos más dinámicos y plásticos del cuerpo humano, comprende aproximadamente el 40% del peso corporal total, contiene entre el 50 – 75 % de todas las proteínas corporales y representa entre el 30 – 50 % del recambio proteico de todo el cuerpo; se compone principalmente de agua (75 %), proteínas (20 %) y otras sustancias que incluyen sales inorgánicas, minerales, grasas y carbohidratos (5 %) (Frontera & Ochala, 2015) y cumple importantes funciones en los procesos fisiológicos y mecánicos dentro de los que encontramos el movimiento (McGregor et al., 2014), el metabolismo (Robert R, 2006), la señalización (Soren & Bente Klarlund, 2008), la resistencia a enfermedades e infecciones (Gaëlle et al., 2006), la independencia funcional (Mary E & Christiana S, 1997) y calidad de vida (Beaudart et al., 2015). Por el contrario, la pérdida de fuerza muscular es un fuerte predictor de deterioro físico en sujetos adultos (Reid & Fielding, 2012) y, una masa muscular reducida, afecta la capacidad del cuerpo para responder al estrés y enfermedades crónicas (Frontera & Ochala, 2015). Se ha demostrado que en condiciones donde la masa muscular disminuye a una tasa de ~1% por año, las reducciones funcionales neuromusculares que la acompañan (fuerza y potencia muscular) ocurren más tempranamente (McGregor et al., 2014).

7.1.2 Suministro de sangre al músculo esquelético

La llegada de este componente es fundamental para los procesos metabólicos básicos del músculo en ejercicio. El flujo sanguíneo muscular experimenta cambios extremos y se relaciona casi en su totalidad con el aumento de la necesidad de los músculos de nutrientes durante la actividad, en especial oxígeno (O₂), gracias a la acción del sistema nervioso parasimpático donde, idealmente, este proceso debe ocurrir al menos tan rápido como se eleva el metabolismo mitocondrial (D. Poole et al., 2021). De hecho, el

flujo sanguíneo está relacionado casi en su totalidad directamente con el empleo del O_2 por los músculos, que es uno de los factores principales que regulan el incremento o disminución del flujo sanguíneo, donde la cantidad plasma sanguíneo que el organismo destinará a los músculos activos variará en función de la masa muscular implicada y la intensidad del ejercicio (Ferreira et al., 2005).

Las arterias y venas que se encuentran paralelas a fibras musculares individuales son las encargadas de brindar el suministro vascular; estos vasos se dividen en numerosas arteriolas, capilares y vénulas para formar una red difusa que penetra y rodea el endomisio (DeLorey et al., 2007). La musculatura contiene el mayor lecho vascular del organismo. Durante el reposo, la mayoría de los capilares musculares conducen poca o ninguna cantidad de sangre, por lo que su flujo sanguíneo bajo estas condiciones es de sólo 0.8 a 1.1 L/min (2 a 8 mL/100 g/min). Durante el ejercicio físico máximo, todos los capilares se encuentran abiertos y el flujo sanguíneo muscular puede aumentar hasta 15 a 20 L/min (40 a 200 mL/100 g/min), lo que equivale casi a 80% del volumen minuto; por tanto, el flujo sanguíneo muscular experimenta cambios extremos relacionados, casi en su totalidad, con el aumento de la necesidad de nutrientes y O_2 durante la actividad física, en donde el consumo de oxígeno (VO_2), que es muy bajo en reposo (0.2 a 0.4 mL/100 g/min), aumenta de forma importante (8 a 15 mL/100 g/min) durante el ejercicio máximo; es así como el flujo sanguíneo disminuye durante la fase de contracción del músculo y aumenta durante la relajación (Fernández-Tresguerres, Jesús A. Cachofeiro et al., 2020). Entre 200 y 500 capilares distribuyen sangre a cada milímetro cuadrado de sección transversal de músculo activo, con hasta cuatro capilares que entran en contacto directo con cada fibra. En los atletas de resistencia, cinco a siete capilares rodean cada fibra; esta adaptación positiva asegura un mayor flujo local de sangre y una oxigenación adecuada del tejido. Por el contrario, cuando un músculo produce alrededor del 60% de su capacidad de generación de fuerza durante varios segundos, la presión intramuscular elevada ocluye el flujo local de sangre durante la contracción (Fukuoka et al., 2015).

Los factores metabólicos locales son parte fundamental en el aumento de flujo vascular durante el ejercicio. La disminución de O_2 en los tejidos es el estímulo inicial, esto es, durante la actividad física, el músculo utiliza O_2 disminuyendo rápidamente la concentración de éste en los tejidos, lo que a su vez causa vasodilatación arteriolar para compensar la carencia relativa de O_2 (D. Poole et al., 2021). El aumento del metabolismo incrementa la presión de dióxido de carbono, disminuye el pH (se acumulan hidrogeniones $[H^+]$), el lactato y aumenta el K^+ . Además, se liberan factores vasodilatadores como nucleótidos de adenina, adenosina, bradiquinina, histamina o acetilcolina. Todos estos factores producen una relajación de las arteriolas y los esfínteres precapilares y aumentan el flujo capilar, asegurando que el músculo reciba el aporte adecuado de O_2 y nutrientes para suplir el aumento de necesidades metabólicas durante el ejercicio, a la vez que se eliminan los productos (Fernández-Tresguerres, Jesús A. Cachafeiro et al., 2020).

Se ha sugerido que el flujo sanguíneo muscular puede limitar la utilización de O_2 por el músculo en la transición del descanso al ejercicio, al menos en determinadas circunstancias (D. Poole et al., 2021). Existe evidencia que sugiere que una extracción limitada de O_2 por la contracción de las células musculares provoca el retraso en la utilización de O_2 en la fase inicial del ejercicio, al menos durante el ejercicio de baja intensidad (D. Poole et al., 2021). Utilizando un modelo de gastrocnemio canino aislado, investigadores reportaron que el flujo sanguíneo fue significativamente más rápido que la utilización de O_2 por el músculo posterior a la aparición de contracciones que requieren $\sim 60\%$ del VO_2 max, pero que el flujo y la utilización de O_2 por el músculo fueron similares después de la aparición de las contracciones que requieren $\sim 100\%$ VO_2 máximo. (B Grassi et al., 1998). Según la revisión sistemática publicada por Piiper J. et al, se ha encontrado en músculos aislados e in situ una pronunciada heterogeneidad del flujo sanguíneo, también durante el ejercicio y con la absorción máxima de O_2 ; con una distribución desigual del flujo sanguíneo y/o la capacidad de difusión de O_2 , la eficiencia de la transferencia de O_2 se reduce con referencia al modelo homogéneo. Por lo tanto, el valor de la capacidad de difusión calculado sobre la base del modelo homogéneo es una subestimación de la capacidad de difusión real y la limitación de

difusión pueden estar sobreestimada. condiciones de difusión y flujo sanguíneo (Piiper, 2000).

7.2 METABOLISMO ENERGÉTICO Y EJERCICIO

El rendimiento del ejercicio de corta duración y de alta intensidad depende de la capacidad para alcanzar altas tasas de utilización de ATP, que deben ir acompañadas de tasas similares en su resíntesis. El ATP es hidrolizado principalmente por la miosina-ATPasa y las bombas de iones, mientras que es resintetizado principalmente por las vías de energía independientes del O₂ (clásicamente llamadas anaeróbicas: fosfágenos y glucólisis) y en mucho menor grado por fosforilación oxidativa. Después del inicio del ejercicio, la tasa de resíntesis de ATP en los miocitos activos aumenta inmediatamente para evitar una caída rápida en la concentración de ATP y para mantener las contracciones musculares. En cuanto a vías oxidativas, se sabe que la tasa de captación pulmonar de O₂ aumenta más lentamente, y sólo alcanza un estado estable varios minutos después del inicio del ejercicio cuando la intensidad es constante, esto obliga a una mayor tasa de suministro de ATP de las vías metabólicas no oxidativas en esta fase transitoria, lo que resulta en una reducción de fosfocreatina y acumulación de lactato muscular, cuya magnitud dependerá de la intensidad y duración del ejercicio (López Chicharro & Fernández Vaquero, 2006).

Durante un ejercicio máximo que dura menos de 60 s, el músculo esquelético obtiene la mayor parte de la energía de los sistemas fosfágenos y la glucólisis. Por otro lado, durante ejercicios más cortos, a 60 s y de alta intensidad, la contribución de los fosfágenos y la glucólisis es aún mayor y, para los ejercicios con duración de 10 segundos o menos y alta intensidad, la contribución del metabolismo aeróbico se considera casi insignificante (López Chicharro & Fernández Vaquero, 2006). Si bien en un comienzo se pensaba que el rendimiento de esta modalidad de ejercicio no se ve afectado por la hipoxia moderada (Weyand et al., 1999), estas afirmaciones pierden peso ya que se basan en extrapolaciones de muestras de biopsia del músculo vasto lateral (VL), que no son lo suficientemente sensibles para evaluar pequeños cambios,

por ejemplo, en las tasas de oxidación del piruvato que pueden verse afectadas por heterogeneidades regionales en absorción de O₂ muscular (Heinonen et al., 2010). Además, la falta de medición directa durante el ejercicio de velocidad en normoxia (o hipoxia) excluye cualquier conclusión con respecto a la magnitud de la contribución del metabolismo aeróbico al gasto de energía muscular. Por lo tanto, se desconoce hasta qué punto el rendimiento del ejercicio en normoxia o hipoxia aguda grave depende del suministro de O₂ (Calbet et al., 2015), lo que si se sabe es que el sustrato energético utilizado dependerá única y exclusivamente de la intensidad y duración del ejercicio (López Chicharro & Fernández Vaquero, 2006)

7.3 FUERZA MUSCULAR

Para conocer el concepto de fuerza es importante definir capacidad física, la cual representa la magnitud que posee un sujeto para realizar un ejercicio (Caspersen et al., 1985), Según Bouchard et al., para esta capacidad existen componentes relacionados con la salud y rendimiento deportivo; dentro de los componentes relacionadas con salud, se incluyen el cardiorrespiratorio (potencia aeróbica máxima o función cardíaca), el componente muscular (fuerza, potencia o resistencia muscular), un componente motor (agilidad, equilibrio o coordinación), un componente morfológico (composición corporal, densidad ósea o flexibilidad) y un componente metabólico (tolerancia a la glucosa, metabolismo de lípidos y lipoproteínas u oxidación de sustratos característicos) (Bouchard et al., 1994). Por otro lado, también es de conocimiento que la capacidad física está determinada genéticamente, pero también puede estar muy influenciada por factores ambientales, como el ejercicio físico, sedentarismo, estilos de vida, etc (Palacios et al., 2015).

Cómo definición, la fuerza muscular es una manifestación del sistema locomotor (Enoka, 1988) y, dependiendo del contexto, existen múltiples razonamientos para definir y explicar esta variable; inicialmente, se reconoce como la máxima tensión manifestada por un grupo muscular a una velocidad determinada (William J; Kraemer & Howard G., 1987); también, como capacidad del sistema neuromuscular de superar

una fuerza externa a través de la actividad muscular (trabajo concéntrico), de actuar en contra de las mismas (trabajo excéntrico), o bien, de mantenerlas (acción isométrica)” (Grosser & Müller, 1992). Una definición más actual la puntualiza como “la capacidad de ejercer resistencia sobre un objeto externo” (Suchomel et al., 2016). Desde un punto de vista de fuerza aplicada, esta variable se define como “el resultado de la acción muscular sobre las resistencias externas dependiendo de la tensión generada por el músculo, de la velocidad de la acción muscular y del tipo de activación (factores internos)” (Pérez-Castilla et al., 2020). Dentro de las resistencias externas influyentes en ella, se pueden encontrar la especificidad de la carga, del movimiento y de la velocidad, los que tienen un rol muy importante en la dirección y optimización del entrenamiento de fuerza.

Llevando el concepto de fuerza al ámbito deportivo, esta se expresa a través de dos relaciones: (i) la relación entre la propia fuerza y el tiempo necesario para producirla, que da lugar a la curva fuerza-tiempo que se utiliza para mediciones más estáticas y (ii) la relación entre fuerza-velocidad de movimiento que dan lugar a la curva de este mismo nombre, utilizada en acciones más dinámicas, la cual relacionada con la carga desplazada, nos lleva a la curva de carga-potencia (Pérez-Castilla et al., 2020), todas ellas importantes en la prescripción de ejercicio físico relacionado con esta variable.

7.3.1 Tipos de contracciones musculares

La contracción muscular, como proceso fisiológico, da como resultado acciones musculares que pueden clasificarse en tres tipos: (i) estática, (ii) dinámica concéntrica y (iii) dinámica excéntrica (William J; Kraemer & Howard G., 1987).

Primeramente, se describe el tipo estática para la cual, antes que todo, se expone el concepto de isometría, siendo necesario destacar que una "contracción" muscular isométrica no es posible; en la literatura el término 'contracción' significa acortar y en la actividad isométrica hay ausencia de movimiento de la articulación o extremidad; la resistencia externa es mayor que la fuerza generada y no se produce trabajo mecánico

externo, aunque si lo hay a nivel intramuscular, por lo tanto, el mejor planteamiento para definir este trabajo muscular sería “acción muscular isométrica” (Staunton et al., 2021)

La acción muscular isométrica ha demostrado ser una herramienta válida en aspectos relacionadas con salud y rendimiento físico, obteniendo efectos similares a las contracciones dinámicas (Lum & Barbosa, 2019) señalando resultados beneficiosos sobre alteraciones cardiovasculares (Inder et al., 2016) y músculo esqueléticas (Keitaro et al., 2017). Investigaciones han establecido fuertes asociaciones significativas entre las pruebas de acción isométrica y el rendimiento de fuerza dinámica (Bazyler et al., 2015; McGuigan et al., 2010). De acuerdo con Suchomel et al., las pruebas de acción isométrica son eficientes en el tiempo, particularmente, con grandes grupos musculares y pueden proporcionar una medida más verdadera de la fuerza "máxima" en comparación con las pruebas de fuerza dinámica en las que la carga final alcanzada puede estar sobreestimada (Suchomel et al., 2016).

En contraparte, las contracciones musculares dinámicas implican la generación de fuerza y movimiento articular; estas acciones (anteriormente conocidas como isotónicas) producen, por una parte, acciones concéntricas las cuales dan como resultado el acortamiento del músculo. Este tipo de contracción no inducen daño muscular de manera significativa, ya que presenta escasos cambios histológicos respecto de la ruptura de proteínas contráctiles, evitando deficiencias funcionales como disminución del rango de movimiento articular, dolor muscular y prolongados tiempos de recuperación posterior al ejercicio (Ochi et al., 2016; Peñailillo et al., 2013), condiciones que contribuyen, de manera aguda, en el estado funcional de los músculos, influyendo en los mecanorreceptores musculares y, en consecuencia en la kinestesia y control motor, situaciones del movimiento que se ven mayormente desarrolladas en las actividades funcionales como estar de pie, caminar y correr (Vieira et al., 2018). Por otra parte, las contracciones dinámicas de tipo excéntricas alargan el músculo (Frontera & Ochala, 2015; A. Myers et al., 2017); la evidencia señala que este tipo de contracciones incrementa la actividad de células musculares y las vías de señalización

anabólica en favor del crecimiento muscular (Douglas et al., 2017; Suchomel et al., 2016) incluso de manera más eficaz que los ejercicios que involucren acciones isométricas o contracciones concéntricas (Hedayatpour & Falla, 2015), lo que se traduce en ganancias de fuerza, adaptaciones neurales y mejor sincronización de unidades motoras, permitiendo una mejor distribución de la carga de trabajo sobre un mayor número de fibras musculares activas en episodios repetidos (Hody et al., 2019; Mike et al., 2015). Por otra parte, las contracciones excéntricas requieren de un menor gasto energético (seis veces menor en comparación a las concéntricas) (Bigland-Ritchie & Woods, 1976) y menor VO_2 en comparación a las acciones isométricas y concéntricas, produciendo baja fatiga y una menor percepción de esfuerzo por el menor trabajo metabólico involucrado (Hedayatpour & Falla, 2015; Hody et al., 2019; Isner-Horobeti et al., 2013), lo cual puede ser explicado, en parte, por el mecanismo de estabilización otorgado por la acción de la Titina, requiriendo menor ATP para mantener la contracción muscular (Douglas et al., 2017; Hessel et al., 2017).

7.3.2 Evaluación de fuerza muscular y sus manifestaciones.

Se ha establecido que la prueba más funcional y masiva utilizada para evaluación de esta variable es la de fuerza de manos y su medida se ha reconocido como predictor de morbilidad y mortalidad (Stenholm et al., 2013).

Por otro lado, dentro de los equipos o métodos más comunes que proporcionan medidas cuantitativas de fuerza se encuentran los dinamómetros isocinéticos y portátiles, todos válidos y fiabilidad en sus mediciones (Stark et al., 2011). Los dinamómetros isocinéticos proporcionan medidas isocinéticas (concéntricas y excéntricas) e isométricas, mientras que los dinamómetros portátiles proporcionan sólo medidas isométricas. Aunque menos utilizado que los dinamómetros isocinéticos y portátiles, el miómetro también rinde medidas isométricas y ha demostrado proporcionar medidas de fuerza tanto de adultos como de niños.

Los dinamómetros portátiles proporcionan una medida cuantificada de la fuerza, se consideran fáciles de usar, con un tamaño conveniente y de bajo costo, siendo accesibles principalmente para el ámbito clínico (Chamorro et al., 2019), a pesar de lo anterior, la confiabilidad informada de estos dispositivos difiere ampliamente entre los autores, informándose errores estándar del 1 al 21% (Arnold et al., 2010; Kelln et al., 2008; Lu et al., 2007)

La dinamometría isocinética es considerada el “Gold Estándar” para la evaluación de la fuerza muscular y representa uno de los métodos más objetivos para cuantificar esta variable en condiciones dinámicas, habiéndose demostrado en numerosas publicaciones la fiabilidad, validez y reproducibilidad de sus resultados (Chamorro et al., 2019). Este dispositivo tuvo un salto tecnológico progresivo alrededor de los años 80 con la introducción de un motor eléctrico el cual permitió agregar la evaluación de la fase excéntrica en su análisis (Dvir & Müller, 2020). Dentro de sus ventajas se encuentran que, al evaluar sólo una articulación por cada prueba facilitando el aislamiento de grupos musculares, los resultados no están influenciados por un desequilibrio de fuerza entre el participante y el examinador (Meyer et al., 2013). Se han descrito en la literatura tres elementos como resultado de esta evaluación: (i) el torque máximo, (ii) el trabajo muscular y (iii) la potencia muscular. El más estudiado es el (i), cuyo comportamiento es analizado a distintas velocidades angulares y se define como el momento de fuerza más alto de la articulación que se produce por la contracción muscular a medida que la extremidad se mueve a través del rango de movimiento, siendo recomendado su uso con propósitos clínicos, de investigación y de predicción del rendimiento físico (Kannus, 1994). El resultado (ii), es definido y determinado como el output de energía mecánica; es decir, la fuerza externa aplicada multiplicada por la distancia a través de la cual se aplica. De acuerdo con el concepto de isocinética, el trabajo se define como el área bajo la curva del torque versus el desplazamiento angular (tiempo), en definitiva, trabajo = Torque x Distancia (Kannus, 1994). Finalmente, (iii) se refiere a la tasa de producción de trabajo muscular la cual se expresa en unidades de trabajo por unidad de tiempo. La potencia media ($W = J/S$) se define como el trabajo total de las contracciones, dividida por el tiempo total de

movimiento. La potencia pico es la cantidad de trabajo realizado durante la mejor repetición de la prueba, dividido por el tiempo del movimiento (Kannus, 1994).

A pesar de lo beneficioso que pueda resultar el análisis de dinamómetros isocinéticos, estos poseen una escasa posibilidad de desarrollar ejercicios funcionales, debido principalmente a que las condiciones “isocinéticas” no implican actividades de la vida diaria, acciones deportivas o actividades funcionales, representando acciones aislada con limitación articular, muy alejado de lo que ocurre durante el movimiento natural y/o deportivo donde el funcionamiento de las articulaciones involucradas es diferente (Dvir & Müller, 2020), este motivo llevó a los investigadores a crear nuevos instrumentos de evaluación como la dinamometría electromecánica funcional.

7.3.3 Dinamometría electromecánica funcional

La dinamometría electromecánica funcional (DEMF) es un nuevo concepto que ha surgido en la última década pensado para controlar el estímulo que genera una resistencia externa, con el objetivo de asimilar lo más cercano a la realidad el gesto deportivo y/o movimientos de la vida diaria. Desde lo estructural, estos equipos corresponden a un tipo de dispositivo multi-articular que permite el control electrónico del movimiento, modulando el recorrido, la intensidad, la velocidad, la carga de trabajo y el modo. Este sistema acompaña la generación de movimiento en diferentes planos y ángulos a través de poleas, replicando gestos específicos, funcionales y controlar el movimiento de forma natural.

Dentro de este tipo de dinamómetro se encuentra DynaSystem, modelo Research, confeccionado en Granada, España, el cual es un dispositivo electromecánico que genera velocidades isocinéticas lineales y cuenta con 5 modos dinámicos (tónico, cinético, elástico, inercial, cónico) y 2 modos estáticos (isométrico, vibratorio) permitiendo evaluar y entrenar a través de resistencia y velocidad constante y variable. La validez y fiabilidad de este dispositivo ha sido demostrada en diferentes articulaciones y etapas del ciclo vital (Baena-Raya et al., 2021; Chamorro et al., 2018; D

Jerez-Mayorga et al., 2021; Martínez-García et al., 2020; Martínez-García et al., 2021; A. Rodríguez-Perea et al., 2019; Á. Rodríguez-Perea et al., 2021a)

7.3.4 Fuerza muscular para la salud y el rendimiento físico

Actualmente, las principales organizaciones que estudian y recomiendan acciones para la salud, han establecido la prescripción de ejercicio físico general para la población, incluyendo en esta, el entrenamiento de fuerza muscular (Tremblay et al., 2011) con el objetivo de disminuir el riesgo de enfermedades crónicas (Chodzko-Zajko et al., 2009; Piercy et al., 2018). Por otra parte, dentro de las recomendaciones de ejercicio físico para la población también se sugiere limitar el tiempo dedicado a actividades sedentarias (Lavie et al., 2019) por ser causas importante de enfermedades cardiovasculares, siendo esta la principal causa de muerte a nivel mundial, con aproximadamente 17.9 millones de muertes cada año (Zheng et al., 2021).

Existe evidencia que el ejercicio de fuerza puede ser tan efectivo como el aeróbico para reducir el riesgo de enfermedades crónicas (Stamatakis et al., 2018). En la literatura, se asoció al entrenamiento de fuerza muscular con una reducción de la mortalidad por todas las causas, una disminución en la incidencia de enfermedades cardiovasculares y una mejora en el funcionamiento físico (El-Kotob et al., 2020). En una reciente revisión sistemática (Saeidifard et al., 2019) se afirma que los entrenamientos físicos que involucran ejercicios de fuerza muscular pueden producir un 21% menos de riesgo de mortalidad por todas las causas y un riesgo límite, pero no estadísticamente menor, de mortalidad por enfermedad cardiovascular. Adicionalmente, en la misma revisión se realizó un análisis de subgrupos para comparar el efecto de la frecuencia de entrenamiento de fuerza por semana, estableciendo que la realización de 1 a 2 sesiones de este entrenamiento se relacionaban con una menor mortalidad por todas las causas, pero los efectos de más de 2 sesiones de este tipo de entrenamiento por semana no fueron estadísticamente significativos (Saeidifard et al., 2019).

El ACSM y la Asociación Americana del Corazón (AHA) han proporcionado recomendaciones de ejercicio para adultos con alteración de salud cardiovascular centrándose, principalmente, en la prescripción de ejercicios aeróbicos (Pescatello et al., 2015; Whelton et al., 2002), sin embargo, los ejercicios que implican trabajo de fuerza muscular cada vez demuestran efectos reductores significativos sobre la salud cardiovascular (Cornelissen & Smart, 2013; Kelley & Kelley, 2000; Pescatello et al., 2015), lo cual también ha sido declarado por una revisión sistemática del año 2016 (MacDonald et al., 2016), en la cual se señala que el entrenamiento de fuerza se asoció favorablemente con una reducción en accidentes cerebrovasculares, una disminución de la presión arterial y una mejora de la fuerza muscular y la función física. Otras investigaciones también han publicado resultados favorables en relación a entrenamiento de fuerza muscular y la mejora de parámetros cardiovascular (Ashton et al., 2020; Cornelissen & Smart, 2013).

Así mismo, el entrenamiento de fuerza muscular parece prolongar efectos benéficos en el manejo conservador de la glicemia; un estudio que registró los efectos de un episodio agudo de entrenamiento aeróbico y de fuerza, a pesar que la disminución fue mayor durante la sesión de entrenamiento aeróbico, los participantes que realizaban entrenamiento con fuerza muscular mantuvieron más bajos los niveles de glucosa plasmática durante las siguientes 24 horas (Yardley et al., 2013). Otros estudios también han demostrados resultados significativos a favor del entrenamiento de fuerza sobre variables del control glicémico en sujetos adultos (Gordon et al., 2009; JungHoon et al., 2017) y adultos mayores (Mcleod et al., 2019). En el mismo aspecto metabólico, este tipo de entrenamiento también ha incrementado el contenido de lipoproteínas de alta densidad y disminución de lipoproteínas de baja densidad, además de aminorar los niveles de colesterol y triglicéridos (Yang et al., 2014). En sujetos con cáncer, se ha observado una disminución en la incidencia de riesgo (Keum et al., 2016), de recurrencia de cáncer (Dieli-Conwright et al., 2018), disminución en la respuesta inflamatoria en sujetos con obesidad (Strasser et al., 2012), aumenta la calidad de vida en general (Segal et al., 2009) y mejor función del sistema inmune (Hagstrom et al., 2016; Sardeli et al., 2018), siendo considerado también para el manejo y tratamiento

de condiciones como artritis (Ciolac & Rodrigues-da-Silva, 2016), demencia (Liu-Ambrose & Donaldson, 2009), depresión (Dos Santos et al., 2018), riesgo de caídas (Levinger et al., 2017), fragilidad (Lauretani et al., 2017), insomnio (D'Aurea et al., 2019), dolor lumbar (Cortell-Tormo et al., 2018), salud mental (Collins et al., 2019), osteoartritis (Magni et al., 2017), osteoporosis (Hong & Kim, 2018), accidente cerebrovascular (Gambassi et al., 2017), enfermedades pulmonares (Silva et al., 2019) y vasculares (Cahu Rodrigues et al., 2020).

Más específicamente según tipo de contracción muscular, las intervenciones basadas en contracción concéntrica son una alternativa de intervención utilizada que se prioriza como complemento en personas que requieran enfocar sus objetivos, principalmente, en actividades de carácter aeróbico (Suchomel et al., 2016), además, los ejercicios de fuerza concéntrica contribuyen previniendo una disminución significativa en la fuerza muscular a diferencia de los ejercicios de tipo excéntrico, lo cual indica que las ganancias producidas después de entrenamientos que prioricen este tipo de contracción son más duraderas en el tiempo (Blazevich et al., 2007). Además de esto, se ha reportado que la contracción concéntrica no es necesariamente una técnica velocidad dependiente, por lo que ha resultado beneficioso su uso en tratamientos de lesiones que impidan cambios de longitud completa del músculo (Pedersen et al., 2019; Roig et al., 2009).

Por el contrario, la práctica de ejercicios que involucren acciones excéntricas han exhibido resultados positivos en el manejo de poblaciones de adultos y adultos mayores con comorbilidades (disfunciones cardiopulmonares, diversas cirugías musculoesqueléticas, disfunciones neurológicas, cáncer y diabetes) (LaStayo et al., 2014) y/o adultos y adultos mayores que se recuperan de una cirugía o una lesión articular, que produzca déficit en sus funciones físicas (Chen et al., 2017). Por otro lado, y de manera general, la utilización de este tipo de contracción en los programas de entrenamiento de fuerza ha demostrado generar incrementos en la densidad mineral ósea (English et al., 2014; Gault & Willems, 2013), disminución de la grasa corporal (Touron et al., 2019) e incremento del gasto energético en reposo, el cual, fisiológicamente, representa entre

60 al 75% del gasto energético diario total en humanos, pudiendo incrementarse hasta 48 horas después de una sola sesión utilizando este tipo de contracción, lo que resulta beneficioso para favorecer el metabolismo corporal (Julian et al., 2018; Paschalis et al., 2010); también se han encontrado resultados favorables de esta intervención en ámbitos de entrenamiento, rehabilitación deportiva y prevención de lesiones (Gual et al., 2016).

7.4 ENTRENAMIENTO DE LA FUERZA MUSCULAR

Este entrenamiento es una intervención empleada en ejercicio físico y rehabilitación para desarrollar la fuerza e incrementar el tamaño muscular debido a una combinación de plasticidad neuronal e hipertrofia muscular (Westcott, 2012); un autor ha definido que un programa de entrenamiento de fuerza debe cumplir con el requisito de *“contraer los músculos contra una resistencia a la ‘sobrecarga’ y producir un efecto de entrenamiento en el sistema neuromuscular”* (Suchomel et al., 2016). De manera general, se sabe que este entrenamiento puede ocurrir como resultado de una sola sesión de ejercicios (efecto agudo) o como adaptación a la carga de trabajo (Pearcey et al., 2021). En el ámbito de las ciencias del ejercicio físico, las “respuestas agudas” son los cambios o ajustes fisiológicos y bioquímicos súbitos, transitorios e inestables producidos durante e inmediatamente después de un único estímulo o esfuerzo, destacándose, en una reciente revisión sistemática, que el entrenamiento de fuerza a corto plazo correspondía a entrenamientos ≤ 6 semanas, mientras que a medio y largo plazo fluctuaba entre 7- 23 y ≥ 23 semanas, respectivamente (Ashton et al., 2020); por otro lado, varios estudios han publicado que el aumento de fuerza durante las primeras semanas de entrenamiento (agudo) tiene un fuerte componente neural y, posteriormente, una mejora adicional de la fuerza a largo plazo, lo cual se debe a la eventual e inicial hipertrofia muscular (Damas et al., 2018; Damas, Phillips, Libardi, et al., 2016; Damas, Phillips, Lixandrão, et al., 2016; Pearcey et al., 2021; Schoenfeld et al., 2017).

Es así como, en cuanto a prescripción, el ACSM recomienda 1-3 series por ejercicio de 8 - 12 repeticiones al 70 - 85% de 1RM para principiantes y 3 - 6 series de 1 - 12 repeticiones con 70 - 100% 1RM para sujetos entrenados (American College of Sports, 2009). Se ha postulado que el entrenamiento con cargas bajas (30 - 60% 1RM) conduce a una hipertrofia similar al entrenamiento con cargas moderadas y altas (> 60% 1RM) (Krzysztofik et al., 2019); además, no es necesario alcanzar la fatiga muscular durante una serie de ejercicios para obtener ganancias significativas en el trofismo muscular, especialmente con cargas elevadas en sujetos no entrenados (Sampson & Groeller, 2016); por el contrario, en sujetos entrenados, la implementación de técnicas avanzadas de entrenamiento para la ganancia de fuerza muscular podría proporcionar un estímulo adicional para incrementar la respuesta de fuerza muscular y prevenir la monotonía excesiva en el entrenamiento (Counts et al., 2017), dentro de estas técnicas se destaca la utilización de carga excéntrica acentuada, tiempo excéntrico prolongado, entrenamiento de fuerza de alta carga combinada con baja carga, utilización de restricción del flujo sanguíneo, uso de super-sets y *drop*-sets, entre otros (Krzysztofik et al., 2019).

En la literatura, se han descrito factores influyentes en la manifestación de fuerza, primeramente se destacan factores no modificables como: sexo, raza, etnia, edad, genotipo; y modificables como cualquier componente de la prescripción del ejercicio, comorbilidades y capacidades funcionales (Lavin et al., 2019). Otra de las variables que se ha considerado influyente en la respuesta muscular al entrenamiento son los determinantes de la carga de trabajo; en este sentido, se ha indicado que el volumen (número de repeticiones por serie) junto con la carga de trabajo empleada, son los elementos claves para generar cambios musculares en un nivel básico de entrenamiento (Krieger, 2010; Schoenfeld et al., 2017), un mayor volumen (28 - 30 series/músculo/semana) se asocia con mayores aumentos en la hipertrofia en comparación con un volumen más bajo (6 - 10 series/músculo/semana) tanto en poblaciones no entrenadas como entrenadas (Schoenfeld et al., 2017, 2019). Por otra parte, se ha mencionado también que la tensión mecánica, el estrés metabólico y el daño muscular pueden influir en respuesta de fuerza (Schoenfeld, 2010); en este sentido, la

sobrecarga de tensión mecánica progresiva se considera dentro de los principales factores del crecimiento muscular y los cambios en la arquitectura de este tejido se logran aumentando la intensidad del esfuerzo del entrenamiento de esta variable; llevando lo anterior a cifras, trabajos con cargas elevadas ($> 85\%$ 1RM) y un número reducido de repeticiones (1 – 5 aproximadamente) con intervalos de descanso (~ 3 -5 minutos), se orientan hacia una mayor tensión mecánica, que da como resultado altos niveles de reclutamiento neuronal (principalmente fibras musculares de contracción rápida) (Krzysztofik et al., 2019).

Desde un aspecto fisiológico, cuando nos enfrentamos en una sesión de ejercicios de sobrecarga, la síntesis de proteínas musculares aumenta después de un episodio agudo y el efecto puede durar hasta 48 horas (Damas et al., 2015), sin embargo, es importante destacar que una respuesta aguda al ejercicio no siempre predice una adaptación a largo plazo (Damas, Phillips, Libardi, et al., 2016). En una etapa aguda, existe un incremento de la fuerza muscular voluntaria en la ausencia de cambios en el tamaño de los músculos lo que se ha atribuido, principalmente, a las adaptaciones neuromusculares por adaptaciones en el sistema nervioso central con el entrenamiento a corto plazo; sin embargo, las adaptaciones de las proteínas del músculo esquelético se han mostrado en las primeras 2 a 4 semanas de ejercicio de sobrecarga (Pearcey et al., 2021). Más detalladamente, una publicación realizada por (Damas et al., 2018) indica que en la fase inicial del entrenamiento de fuerza (≤ 4 sesiones de RT previas) los aumentos en el área de la sección transversal del músculo son principalmente atribuibles a la hinchazón muscular inducida por el daño a este tejido; luego (después de ~ 10 sesiones), sobreviene una modesta magnitud de hipertrofia muscular; pero solo durante una última fase del entrenamiento de sobrecarga (después de ~ 18 sesiones) se observa una verdadera hipertrofia muscular. En este sentido, se ha atribuido que los aumentos iniciales en la síntesis de proteínas musculares posteriores al entrenamiento de fuerza, probablemente se dirijan a la reparación y remodelación muscular debido al daño por el entrenamiento y no se correlacionan con la eventual hipertrofia muscular inducida por varias semanas con este tipo de entrenamiento; es así como los aumentos en la síntesis de proteínas musculares después de la sesión de entrenamiento de

sobrecarga sólo contribuyen a la hipertrofia muscular después de una atenuación progresiva del daño y, aún más significativamente, cuando este es mínimo (Damas, Phillips, Libardi, et al., 2016). Por otra parte, los protocolos de entrenamiento de fuerza que no promueven un daño muscular significativo en el tejido también inducen una hipertrofia muscular similar y ganancias de fuerza en comparación con las condiciones que promueven el daño muscular inicial, por lo tanto, es importante destacar que el daño muscular no es el proceso que media o potencia la hipertrofia inducida posterior a un entrenamiento de sobrecarga muscular (Damas et al., 2018). En etapas más avanzadas con este tipo de entrenamiento, los aumentos adicionales en la fuerza máxima combinados con factores centrales, la especificidad de la tarea y la coordinación de múltiples articulaciones mejoran la capacidad del individuo para aumentar el rendimiento muscular (Ford et al., 2011).

En el caso de deportistas más entrenados, estos pueden continuar ganando fuerza relativa; sin embargo, los beneficios directos para el desempeño físico pueden no ser tan sustanciales; una revisión sistemática indicó que si bien la fuerza es una cualidad básica que influye en el rendimiento de un sujeto, el grado de esta influencia puede disminuir cuando los deportistas mantienen un nivel muy alto de fuerza (W. J. Kraemer & Newton, 2000). Por lo tanto, la ventana de adaptación para una mayor mejora de la fuerza se reduce a medida que un individuo incrementa esta, pudiendo ser la razón por la que otra literatura ha sugerido que el énfasis del entrenamiento puede desplazarse hacia el entrenamiento de "potencia" después de que se haya alcanzado un estándar específico de fuerza (Suchomel et al., 2016). En este sentido, la efectividad de los programas de entrenamiento de fuerza puede explicarse por la segunda ley del movimiento de Newton (Fuerzas R que actúan sobre un objeto = masa del objeto * Aceleración del objeto). Dentro de esta ley, el cambio en el movimiento de un objeto (es decir, la aceleración) es directamente proporcional a las fuerzas impresas sobre él. Si se producen mayores fuerzas durante un período de tiempo dado, se produce una mayor aceleración, lo que resulta en una mayor velocidad. Por tanto, los aumentos tanto de la fuerza como de la velocidad darán como resultado en última instancia un aumento de la potencia (Suchomel et al., 2016; Wallace et al., 2018).

7.4.1 Respuesta fisiológica al entrenamiento de fuerza muscular

Se ha demostrado que la principal causa de hipertrofia es un aumento en el tamaño de las fibras musculares individuales debido al aumento de la síntesis de proteínas y la adición de miofilamentos, miofibrillas y sarcómeros (Damas et al., 2015). En este sentido, la activación de las células satélites es importantes para mantener un tamaño constante de cada dominio nuclear; estas células son las células madres adultas del músculo esquelético, residen y se mueven dentro de la matriz extracelular, interactuando con el tejido conectivo y los fibroblastos, en un estado de fuerte adhesión a la matriz extracelular (en ausencia de daño muscular) permanecen en un estado inactivo, pero con la adhesión muerta de la matriz extracelular, por el contrario, con daño muscular inducido por el ejercicio, las células satélites se mueven y proliferan para apoyar la remodelación tisular (Dumont et al., 2015); específicamente, los estudios han propuesto que los aumentos en el tamaño de la fibra muscular de más de ~ 26% (no menos del 15%) requieren la donación de núcleos por parte de células satélites.

Por otro lado, cuando las fibras crecen como respuesta a un estímulo hipertrófico, los mionúcleos se reclutan a partir de células satélite para soportar el mayor volumen citoplasmático. Durante la atrofia, los núcleos "en exceso" se eliminan del sincitio mediante apoptosis nuclear selectiva; en su interpretación más estricta, el número de mionúcleos está regulado de modo que el volumen del dominio mionuclear sea el mismo para la fibra en sus estados atrófico e hipertrófico (Gundersen, 2016). Para el caso de las fibras musculares vírgenes (sin entrenamiento de sobrecarga previo) y el crecimiento hipertrófico precedente, los mionúcleos se reclutan a partir de células satélite, lo que reduce temporalmente el volumen del dominio mionuclear, lo que da lugar a una fibra grande con muchos mionúcleos. Tras una posterior hipotrofia o atrofia, los mionúcleos se mantienen, lo que da lugar a una pequeña fibra con una alta densidad y pequeños dominios mionucleares; estas fibras pueden hipertrofiarse sin reclutar nuevos núcleos, y esta ruta de reentrenamiento parece ser más rápida que la de células vírgenes o de la "primera ruta de entrenamiento" (Gundersen, 2016). El número permanentemente más alto de mionúcleos representa la memoria muscular,

estos nuevos núcleos preceden al crecimiento en el tiempo y pueden estar relacionados causalmente con el posterior crecimiento de las fibras. Tras el desentrenamiento posterior, las fibras mantienen el número elevado de núcleos, pero pierden proteínas, lo que resulta en una fibra pequeña con un número elevado de núcleos (Gundersen, 2016). Incluso considerando sólo la fatiga aguda, Angelo Mosso et al., explicó que la fatiga puede definirse por dos series de fenómenos: la disminución de la fuerza muscular y una sensación de fatiga. En este trabajo doctoral, nos centraremos únicamente en la primera parte de esta definición, también conocida como fatiga neuromuscular o fatigabilidad (Place & Millet, 2019).

7.5 FATIGA MUSCULAR

La fatiga se ha definido de muchas formas diferentes, para efectos prácticos en este trabajo abordaremos la fatiga aguda la cual es, probablemente, una reducción inducida por el ejercicio de la máxima fuerza de contracción voluntaria, o la incapacidad de producir una cierta fuerza o potencia esperada, por lo tanto y a modo de análisis, si la fatiga es una pérdida de la capacidad de generación de fuerza, es importante señalar que la recuperación de esta capacidad se producirá cuando esta vuelva a su desempeño normal. (Place & Millet, 2019); su naturaleza responde a un carácter multifactorial ya que aún los mecanismos responsables de su aparición permanecen imprecisos (López Calbet & Dorado García, 2006).

Dentro de las causas que dan origen a esta variable encontramos: alteraciones del pH, de la temperatura y del flujo sanguíneo, la acumulación de productos del metabolismo celular (especialmente de los que resultan de la hidrólisis del ATP, como el ADP, AMP, IMP, Pi y amonio), la pérdida de la homeostásis del ión Ca^{2+} , el papel de la cinética de algunos iones en los medios intra y extracelular (como el K^{+} , Na^{+} , Cl^{-} Mg^{2+}), lesión muscular (inducida por el ejercicio) y el stress oxidativo (López Calbet & Dorado García, 2006). A pesar de los antecedentes mencionados, los mecanismos asociados a su etiología se encuentran aún por determinar, sin embargo, es posible destacar que influyen en su aparición el tipo, duración e intensidad del ejercicio, el tipo de fibra

muscular reclutada, del nivel de entrenamiento del sujeto, de la disponibilidad de sustratos utilizados y de las condiciones ambientales de realización del ejercicio, entre otras (López Calbet & Dorado García, 2006; Wyon & Koutedakis, 2013). En este sentido, la naturaleza multifactorial y complejidad de la misma deriva en una división funcional del concepto: (i) fatiga central y (ii) fatiga periférica, que lleva a factores metabólicos interactivos que afectan a los músculos (fatiga periférica) y al cerebro (fatiga central) durante la realización de trabajo físico (Sesboüé & Guinestre, 2006).

La fatiga periférica resulta de las alteraciones de la homeostasis en el músculo esquelético, debido a una falla o limitación de uno o más procesos en la unidad motora (nervios periféricos, ligaciones neuromuscular o fibras musculare); como consecuencia de la disminución del pH, se produce un aumento de la capacidad del retículo sarcoplasmático para retener el Ca^+ , reduciendo la estimulación del proceso contráctil (Sesboüé & Guinestre, 2006). Por otro lado, la fatiga central actúa sobre la parte extra muscular de la cadena de mando de la contracción muscular voluntaria; incluye factores que determinarán la reducción de la contractilidad muscular independientemente de los factores intramusculares y/o metabólicos. Estos factores se extienden desde el nivel cortical hasta la unión neuromuscular (Sesboüé & Guinestre, 2006).

7.5.1 Fatiga muscular, rendimiento físico y sobreentrenamiento

Las cargas de entrenamiento impuestas en el deportista están en el origen del síndrome de sobreentrenamiento, marcado por una disminución de la capacidad para realizar el ejercicio físico solicitado y por alteraciones del comportamiento. El sobreentrenamiento es causado por un desequilibrio energético, y se ve facilitado por limitaciones cronológicas, biológicas y psicológicas (Place & Millet, 2019). Estos factores son responsables de los cambios hormonales, como la reducción del uso de esteroides sexuales o del eje hipotálamo-pituitario-adrenérgico. Estas influencias metabólicas y hormonales inducen un cambio en la actividad de los neurotransmisores cerebrales, como la reducción del nivel de neurotransmisor monamina y el aumento del nivel de serotonina. Los datos experimentales indican que estos cambios de

neurotransmisores son responsables más de los cambios de comportamiento que la disminución del rendimiento físico (Sesboüé & Guincestre, 2006).

Cualquiera que sea la forma de ejercicio la fatiga es siempre, a nivel periférico, un problema de acumulación de metabolitos, y estos fenómenos aún no están del todo resueltos. Es cierto que el aumento de lactato y la reducción de los niveles de pH pueden influir en su aparición, pero no explican todo el fenómeno. A nivel central, la única mejora que se puede notar con el entrenamiento de resistencia es la termorregulación, que retrasa la aparición de la sensación de fatiga (Place & Millet, 2019), por lo que cualquier nuevo conocimiento que permita contribuir al manejo de esta variable en pro del rendimiento físico será un aporte para las ciencias del deporte y rehabilitación física.

7.6 BIOMARCADORES METABÓLICOS Y PRESCRIPCIÓN DE EJERCICIO

Un biomarcador (marcador biológico) es un producto derivado del organismo, que es medible y utilizado como indicador objetivo del estado biológico, del rendimiento, del progreso, del entrenamiento y/o sobreentrenamiento de un sujeto o de diferentes procesos o situaciones que ocurren en el organismo tanto en aspectos de salud como en el ámbito del ejercicio físico (Palacios et al., 2015). La mayoría de los biomarcadores se miden en sangre, orina y saliva y se prefiere trabajar con procedimientos de extracción no invasivos, donde los mayormente utilizados son los de composición corporal (especialmente masa muscular, masa grasa, peso), condición física (capacidad cardiovascular, fuerza, agilidad, flexibilidad), frecuencia cardiaca y presión arterial (Palacios et al., 2015).

Es importante destacar que existen pocos rangos de referencia de biomarcadores específicos para atletas, y esto se debe en parte a que se produce una gran variación interindividual en los valores de los biomarcadores y a que su medición puede variar según el contexto, lo que puede suponer una interpretación errónea de los resultados analizados al clasificar de acuerdo con la sugerencia del fabricante del instrumento de

evaluación o según otras poblaciones. Por otra parte, medir un único biomarcador no permite una determinación precisa del estado de salud o rendimiento de un individuo ya que, muchas veces, su presencia puede responder a escenarios fisiológicos diferentes y no relacionados entre sí (ejemplo Interleucina-6) (Lee et al., 2017), por lo que ampliar el conocimiento de estos marcadores biológicos sigue siendo un constante desafío para los investigadores en todas las áreas de la fisiología.

7.6.1 Tipos de biomarcadores empleados en ejercicio y deporte

Existen varios biomarcadores utilizados para monitorear el rendimiento físico de un sujeto, en este sentido los biomarcadores más utilizados son los de fatiga y estrés crónico (Cortisol y testosterona); de sobreentrenamiento (lactato, creatina fosfofructokinasa, creatina, amoníaco, lactato deshidrogenasa (LDH), ácido úrico; biomarcadores de riesgo cardiovascular (Homocisteína (Hcy) y troponina cardiaca) y biomarcadores de estrés oxidativo (Proteína C-reactiva (PCR), Interleucina-6 (IL-6) y Leucocitos), entre muchos otros (Palacios et al., 2015). A pesar de la gran utilidad de estos en aspectos de rendimiento deportivo, muchos no pueden ser utilizados de manera masiva debido al alto costo en su acceso y procedimiento.

En la literatura se han publicado sugerencias que pueden orientar a los evaluadores en qué momento realizar la medición de biomarcadores biológicos en un ciclo de entrenamiento deportivo, destacando que no todos los sujetos responden de la misma manera a una carga de trabajo y plan de entrenamiento; es así como la sugerencia involucra 4 aspectos: (i) antes y al final del entrenamiento de pretemporada; (ii) durante la temporada competitiva, las pruebas se pueden administrar antes y después de una serie de ejercicios durante una semana de entrenamiento particularmente desafiante, la medición de biomarcadores en este punto aclarará cualquier deficiencia o defecto en las respuestas de los biomarcadores a un estrés agudo; (iii) realizar la prueba antes y varias veces después de un evento de competencia importante o una lesión; en este caso, hay un estrés severo impuesto por el evento competitivo o una lesión y las pruebas de biomarcadores varias veces después del evento permitirán al

atleta determinar si la recuperación se ha producido en un nivel bioquímicamente medible. Este caso destaca el potencial de las pruebas de biomarcadores para detectar con precisión posibles problemas de salud/recuperación cuando un atleta puede sentirse listo, pero en realidad no lo está a nivel tisular/celular. (iv) Realizar las pruebas de biomarcadores en varios días fuera de temporada cuando un atleta esté en forma, saludable y descansado, para así determinar sus valores promedio de reposo y ser probado en condiciones de entrenamiento (Lee et al., 2017)

7.6.2 Biomarcadores del estado muscular

La evaluación del estado muscular con biomarcadores sanguíneos debe centrarse en la regulación endocrina de la reparación/adaptaciones musculares, la homeostasis metabólica (equilibrio anabólico-catabólico, deficiencias de proteínas / aminoácidos, disponibilidad de sustrato), daño muscular, excitabilidad y fatiga musculares. Hay marcadores bien validados relacionados con la fatiga, la recuperación, la síntesis de proteínas o las estrategias de alimentación, que son las principales preocupaciones de los atletas, dentro de estos encontramos: testosterona, Cortisol, Dehidroepiandrosterona (DHEA), Hormona del crecimiento, Factor de crecimiento insulínico 1 (IGF-1), Globulina fijadora de hormonas sexuales, hormona Luteinizante, Creatin kinasa, Nitrógeno úrico, triptófano, glutamina, entre otros (Lee et al., 2017).

Más específicamente para aspectos relacionados con fuerza muscular, resulta interesante mencionar que los biomarcadores de fatiga periférica podrían ser una herramienta de pronóstico para identificar a sujetos que tienen mayor riesgo de ver disminuido su rendimiento físico en base a esta variable. Hoy en día, también se ha reconocido el uso de oximetría muscular como un biomarcador de rendimiento de la actividad muscular a través de la lectura de cromóforos de hemoglobina desoxigenada (HHb), hemoglobina oxigenada (HbO₂) y mioglobina (Mb) en sangre, del cual ya se ha demostrado su relación con aspectos de fatiga muscular (Sáez Sáez De Villarreal et al., 2010).

7.7 OXIMETRÍA MUSCULAR

La oximetría muscular es la medida colorimétrica del grado de saturación de O_2 . De manera general, engloba el funcionamiento de la HbO_2 y Mb y su función de transporte de O_2 hacia el músculo; su valor está determinado al conocer el O_2 transportado por cada una de estas proteínas de acuerdo con la capacidad de cada una, la cual puede ser medida utilizando equipos no invasivos que utilicen espectrofotometría con luz espectral del infrarrojo cercano (NIRS) (Barstow, 2019).

7.7.1 Fisiología de la mioglobina y hemoglobina

La Mb es uno de los miembros de la familia de las globinas, que también incluye a la hemoglobina (Hb) y a menudo se compara estructural y funcionalmente con la Hb, por lo que comúnmente se ha denominado a la Mb como miohemoglobina o hemoglobina muscular. La Hb tiene cuatro cadenas polipeptídicas y cuatro sitios de unión al O_2 , pero su afinidad por este elemento es menor en comparación con la unión que realiza la Mb. La unión que realiza la Hb al O_2 (HbO_2) es de manera cooperativa, como resultado de su naturaleza tetramérica, lo permite observar su curva característica en forma sigmoidea. Por otro lado, la Mb es una proteína relativamente pequeña constituida por una cadena polipeptídica de 153 residuos aminoácidos con un sitio de unión al O_2 . Está presente principalmente en el músculo estriado de los vertebrados y en concentraciones mucho más bajas en las células del músculo liso endoteliales e incluso tumorales, describiéndose como una proteína muy eficaz para extraer O_2 de la sangre. La unión de la Mb al oxígeno se hace de manera no cooperativa, lo que da como resultado una curva de saturación de O_2 con forma hiperbólica (Ordway & Garry, 2004). La Mb es la razón del color rojo del músculo de la mayoría de los vertebrados (Vanek & Kohli, 2021).

En cuanto a su localización, la HbO_2 se encuentra en el torrente sanguíneo como parte de los eritrocitos, al contrario de la Mb que se encuentra en el citoplasma de los miocitos cardíacos y el sarcoplasma de las fibras oxidativas del músculo esquelético y cardíaco;

también está presente en concentraciones mucho más bajas en el músculo liso y las células tumorales endoteliales (Vanek & Kohli, 2021).

7.7.2 Uso de la tecnología NIRS en oximetría muscular.

Como se mencionó anteriormente, los dispositivos NIRS se han reconocido como una técnica para medir, indirectamente y de manera no invasiva, el metabolismo muscular valorando el nivel de O_2 en los tejidos a través de los cambios en la absorción óptica de este elemento al reconocer el equilibrio entre su suministro y consumo en el lecho vascular (arterias pequeñas, arteriolas, capilares, vénulas, venas pequeñas) y el grupo hemo de Mb en las fibras musculares (Hajime, 2013).

Teniendo en cuenta que los capilares contribuyen al 90% del volumen sanguíneo total en el músculo y, en condiciones normales, todas las regiones del músculo reciben sangre arterial casi completamente oxigenada, los cambios de oxigenación detectados por NIRS reflejarían principalmente cambios en los capilares (relacionados con Hb) y componentes intracelulares (relacionados con Mb) de O_2 (Perrey & Ferrari, 2018b).

Un estudio combinado de NIRS y resonancia nuclear magnética demostró que la cinética de Mb desoxigenada evaluada con resonancia coincidía con la observada con NIRS posicionada en el músculo gastrocnemio cuando se ejecutaba una flexión plantar (Hampson & Piantadosi, 1988), por otro lado, se ha demostrado a través de ecografía Doppler que existe una relación entre la hemoglobina total (tHb) y el flujo sanguíneo durante el ejercicio, observándose una alta asociación entre los cambios en la tHb y las respuestas del flujo sanguíneo (Bopp et al., 2014). Estos resultados, y otros revisados en la literatura, establecen la validez para observar señales de oximetría muscular en el músculo esquelético (Crum et al., 2017; Farzam et al., 2018; Koga et al., 2015; Mancini et al., 1994; Stone et al., 2016); por otra parte, también se ha reconocido la fiabilidad de estos dispositivos en la práctica de diferentes protocolos de ejercicio físico. (Baláš et al., 2018; Lucero et al., 2018; Miranda-Fuentes et al., 2020; Stone et al., 2016). Estudios recientes llevados a cabo con NIRS en combinación con espectroscopia de resonancia

nuclear magnética, con el objetivo de distinguir entre la Hb y Mb desoxigenada durante la isquemia y el ejercicio, han confirmado una contribución predominante de Mb a la señal NIRS muscular (Bendahan et al., 2017).

En cuanto a su funcionamiento, los NIRS realizan la cuantificación de la concentración de los cromóforos del grupo hemo a través de los principios de la ley de Beer-Lambert (Bruno Grassi & Quaresima, 2016) la cual utiliza la espectrofotometría para conocer la cantidad presente de una sustancia por medio de la luz. De manera general esta ley establece que, desde la óptica, una luz a una longitud de onda incidente (λ), es decir que atraviesa un tejido (I_{in}), va a ser distinta a la que sale de ella (I_{out}) porque la solución (c) va a absorber una cierta cantidad de luz en el espacio (D). La ley indica que la luz que atraviese esta sustancia va a depender de: la cantidad de luz absorbida, del tipo de sustancia que atraviesa, la distancia que recorra la luz y la concentración de la sustancia (figura 1) (Yamashita & Niwayama, 2013).

Es importante destacar que el NIRS que utiliza luz transmitida no es adecuado para la medición clínica, porque es difícil detectar la luz transmitida en tejidos humanos adultos; por lo tanto, las técnicas de reflexión son las que se utilizan con mayor frecuencia en la actualidad en esta área (Peikon, 2020).

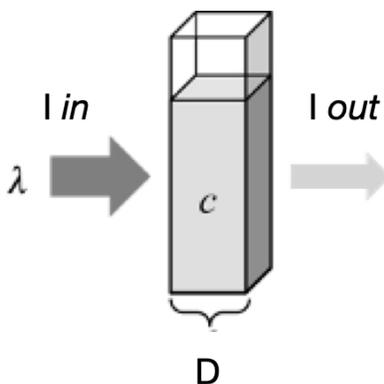


Figura 1. Ejemplificación ilustrada de la Ley de Lamber-Beer en un tejido. A = absorbancia; λ = longitud de onda; I_{in} = luz que atraviesa el tejido; I_{out} = luz que sale; c = solución por la que atraviesa λ ; D = distancia del espacio donde se evalúa la concentración del cromóforo.

En este sentido, las ecuaciones que representan la Ley de Lamber-Beer sería (figura 2 y 3):

$$-Log \frac{I_{out}}{I_{in}} = \varepsilon * C * D$$

Figura 2: 1ª Ecuación de la ley de Lamber-Beer

Donde I_{in} es la luz que entra hacia el músculo objetivo, I_{out} es la luz transmitida que pasa a través del cuerpo, D (mm) es la distancia, ε [1/mM*mm] es el coeficiente de extinción, y C [mM] (M:mol) indica la concentración que queremos obtener. Debido a que en el uso real existe una influencia de perturbaciones como aparición de movimiento fisiológico y la luz exterior, la ley de Lambert-Beer se modifica para su aplicación como se muestra a continuación:

$$-Log \frac{\Delta I_{out}}{I_{in}} = \varepsilon * \Delta C * D + \Delta S$$

Figura 3: 2ª Ecuación de la ley de Lamber-Beer modificada

Donde ΔI_{out} es el cambio de la luz transmitida que pasa a través del cuerpo, ΔC es el cambio en la concentración, y ΔS el cambio en el efecto de dispersión. Esta ecuación se denomina ecuación de modificada de la ley de Lambert-Beer (Yamashita & Niwayama, 2013).

En los últimos años, se han utilizado tres técnicas NIRS diferentes, cada una basada en un tipo de iluminación específica (Hajime, 2013):

1. La modalidad de onda continua (CW): basada en la iluminación constante del tejido, la cual simplemente mide la atenuación de la luz a través de los tejidos.
2. Instrumentos de dominio de frecuencia (FD), que iluminan los tejidos con luz de intensidad modulada, los cuales miden tanto la atenuación como el desplazamiento de fase de la luz emergente.
3. La técnica de dominio del tiempo (TD), que ilumina los tejidos con pulsos cortos de luz, detecta la forma del pulso después de la propagación a través de los tejidos.

La modalidad CW de NIRS para medir la saturación de HbO₂ del músculo (SmO₂ (%)), con su método de espectroscopía resuelta espacialmente (SRS), es el enfoque de oximetría más utilizado y es el que se empleará en esta investigación (Perrey & Ferrari, 2018a). Más específicamente, el método SRS consiste en medir la atenuación óptica a partir de los coeficientes de absorción relativa a diferentes longitudes de onda en una distancia medida en varios puntos focales de la emisión de luz; a partir de los valores de intensidad medidos en los diferentes detectores, se calcula una pendiente de atenuación de luz y se inserta en una ecuación (basada en modelos de propagación de luz) para estimar el coeficiente de absorción del tejido, y luego HbO₂ y HHb. Esto permite la determinación de la relación HbO₂ a Hb total ($O_2Hb \setminus \Delta HHb$) y, por tanto, la saturación de HbO₂ tisular (en porcentajes %) (Perrey & Ferrari, 2018b).

Los sistemas basados en CW ofrecen las ventajas de un bajo costo y facilidad de transporte (Hajime, 2013). En orden ascendente, los instrumentos basados en CW, FD y TD requieren un mayor costo y complejidad tecnológica. Por otro lado, sólo las técnicas FD y TD ofrecen la caracterización absoluta de las propiedades ópticas del tejido (coeficientes de absorción y dispersión reducida), a partir de los cuales es posible recuperar valores absolutos de concentración de HbO₂ y desoxi-Hb (HHb), y un parámetro derivado de Hb total (tHb = O₂Hb + HHb). La metodología NIRS se caracteriza por una resolución temporal relativamente alta (frecuencia de muestreo de hasta 100 Hz con instrumentos basados en CW y FD, y alrededor de 5 Hz con instrumentos basados en TD) que permite medir el curso temporal de los cambios en SmO₂ durante breves ejercicio de prensa de piernas (2-4 s) o incluso un ciclo de pedaleo en ciclismo (Ferrari et al., 2011)

Uno de los principios de básicos para utilizar espectroscopia de infrarrojo cercano en el músculo en vivo es utilizar longitudes de onda en el intervalo de 700-850 nm debido a que este rango tiene las características para una mejor penetración en el tejido biológico que la luz visible (Ferrari et al., 2011). Para obtener una señal de luz reflejada de los tejidos humanos, en el dispositivo, la fuente de luz y el fotodetector (PD) son normalmente separados entre 2,5 y 3,0 cm. La luz del NIRS penetra en un arco poco

profundo (aproximadamente 1,25 - 2,0 cm), por lo que se dice que estos dispositivos miden la oxigenación muscular de pequeños vasos o capilares sanguíneos; distancias de separación más grande entre la fuente de luz y el PD dan como resultado penetraciones más profundas, pero también se traduce en menos luz que llega al detector (figura 4).

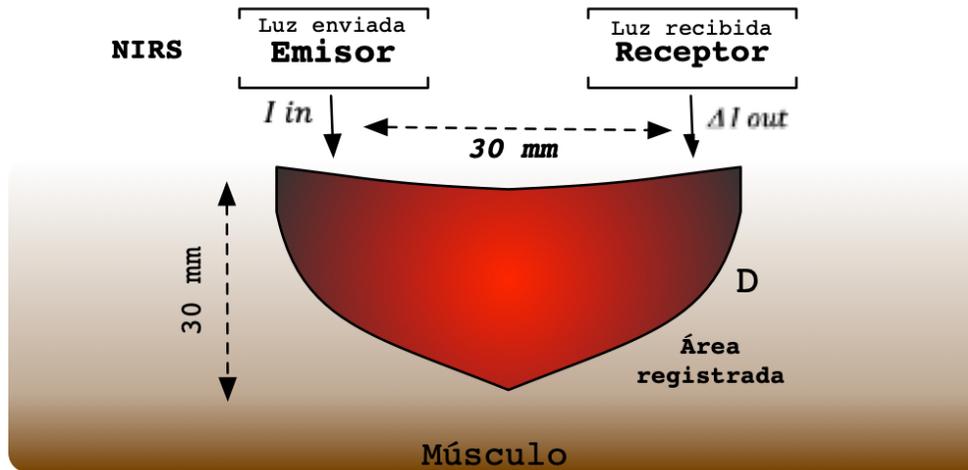


Figura 4. Ejemplificación ilustrada del funcionamiento y reflexión de luz de los dispositivos NIRS. (Gómez-Carmona et al., 2020).

La interacción del tejido con cualquier banda de frecuencia incluye reflexión, refracción, absorción y dispersión múltiple de fotones en el tejido (Althobaiti & Al-Naib, 2020). La profundidad de penetración real y la longitud de onda son muy difíciles de medir y varían con la concentración de Hb y el grosor del tejido (por ejemplo, piel, grasa, cráneo, etc) (Hajime, 2013) debido a que los materiales de los tejidos biológicos son multicapa, multicomponente y ópticamente no homogéneos. En longitudes de onda NIRS, los átomos o moléculas absorben una parte de la energía luminosa, el nivel de absorción se determina en función de la composición molecular del tejido, la longitud de onda de la luz emitida y el grosor del tejido (Althobaiti & Al-Naib, 2020); moléculas como el agua y los lípidos son absorbentes mínimos en comparación con la Hb que contiene hierro presente en la sangre, por lo tanto, la Hb y la HbO_2 absorben la luz con fuerza. (Yamashita & Niwayama, 2013).

7.7.3 NIRS y ejercicio físico.

En la actualidad, la utilización de este dispositivo en el ámbito del ejercicio ha sido bajo distintas marcas y modelos (tabla 1) dependiendo de los objetivos de estudio de cada investigador y los recursos con que se cuenten y, a pesar de promocionarse como una instrumentación prometedora para evaluar y profundizar el rendimiento músculo esquelético oxidativo cuando se utiliza en entornos deportivos (Perrey & Ferrari, 2018b), todavía existe la necesidad de mayor investigación con ensayos aleatorizados/longitudinales para respaldar las ventajas de estos equipos en ejercicio.

Es en este sentido que, en el año 2018, un equipo de investigadores publicó una revisión sistemática cuyo objetivo fue destacar la aplicación de la oximetría muscular en la evaluación del rendimiento del músculo esquelético oxidativo a las actividades deportivas y enfatizar cómo esta tecnología se ha aplicado al ejercicio y al entrenamiento (Perrey & Ferrari, 2018b); en esta revisión, los autores hacen un análisis crítico de 57 artículos científicos sobre la utilización de NIRS durante el ejercicio físico. Dentro de las disciplinas analizadas, las que más utilizan esta tecnología y sus diversas variantes comerciales son ciclismo, correr y la escalada; por el contrario, actividades como hockey, judo, kayak, remo y natación, son los deportes que en menor medida han utilizado esta tecnología. A su vez, los mismos autores destacan que el VL es el músculo mayormente analizado, seguido del flexor profundo de los dedos, flexor carpo y gastrocnemio; pesar de que también se han revisado otros sitios frecuentes, todos coincidiendo que la posición del dispositivo debe ser en el vientre muscular. Algunas especificidades de protocolo son: (i) a 15 cm desde la grieta de la rótula en el VL del cuádriceps; (ii) 10 cm del borde proximal de la rótula y, (iii) línea media del músculo VL (Gómez-Carmona et al., 2019).

Por otro lado, dentro de los cuidados que han sugerido los investigadores para la utilización de este equipo en el área de investigación se menciona, para evitar la contaminación con luz, es necesario rasurar la zona de colocación y proteger el

dispositivo con algún material oscuro (venda, malla compresiva o cinta elástica) de la luz ambiental (Gómez-Carmona et al., 2019)

Tabla 1. Características de NIRS utilizados en artículos de ciencias del deporte.

Dispositivo	Empresa	Técnica utilizada	Fuente de luz; nº de canales	Nº de w/l (SD, mm)	Tiempo de resolución (Hz)	Parámetros
InSpectra 325	Hutchinson, USA	CW	LED; 1	4 (25)	0.3	StO ₂
Invos 5100	Medtronic, USA	CW	LED; 2	2 (40)	0.2	SO _{2m}
Moxy	Fortiori Design, USA	CW	LED; 1	4 (25)	2	SO _{2m}
NIRO-200^c	Hamamatsu, Japan	CW	Láser; 2	3 (40)	20	TOI, Δ tHb/ Δ HHb/ Δ O ₂ Hb
NIRO-300^c	Hamamatsu, Japan	CW	Láser; 2	4 (40)	2	TOI, Δ tHb/ Δ HHb/ Δ O ₂ Hb
NIRO-500^c	Hamamatsu, Japan	CW	Láser; 1	4 (40)	2	Δ tHb/DHHb/ Δ O ₂ Hb
NONIN 7600	Nonin, USA	CW	LED; 2	4 (40)	0.3	rSO ₂
OxiplexTS	ISS Inc, USA	CW	Láser; 2	2 (40)	50	SO _{2m} , aHHb, aO ₂ Hb, atHb
Oxymon Mk-III	Artinis, Países bajos	CW	Láser; 1	2 (50)	50	Δ tHb/ Δ HHb/ Δ O ₂ Hb
PocketNIRS Duo	DynaSense Inc, Japan	CW	LED; 2	3 (50)	60	Δ tHb/ Δ HHb/ Δ O ₂ Hb
PortaLife	Artinis, países bajos	CW	LED; 1	2 (40)	50	TSI, Δ tHb/ Δ HHb/ Δ O ₂ Hb
PortaMon	Artinis, Países bajos	CW	LED; 1	2 (40)	10	TSI, Δ tHb/ Δ HHb/ Δ O ₂ Hb

Observaciones: a = absoluto; Δ = cambios relativos; HHb = desoxihemoglobina; O₂Hb = oxihemoglobina; tHb = hemoglobina total; CW = espectroscopia de onda continua; FD = espectroscopia de dominio de frecuencia; LED = diodo emisor de luz; NIRS = espectroscopia de infrarrojo cercano; rSO₂ / SO_{2m} / StO₂ / TOI / TSI = % de saturación de oxihemoglobina muscular; SD = mayor distancia fuente-detector; w/l = longitudes de onda. Tabla modificada extraída de (Perrey & Ferrari, 2018b).

7.7.4 NIRS y oximetría muscular como respuesta al ejercicio.

Hace sólo unos años que esta tecnología se ha considerado con mayor frecuencia en la evaluación y entrenamiento de fuerza muscular, lo cual puede ser evidenciado en algunas revisiones publicadas en la literatura. Así es el caso de Perrey & Ferrari, quienes parecen ser los pioneros en incluir en una revisión sistemática estudios con el uso de NIRS y entrenamiento de fuerza con pesos libres dentro de las disciplinas estudiadas (Perrey & Ferrari, 2018a), con dos estudios los cuales se realizaron en músculos de las extremidades inferiores, concluyendo ambos estudios que posterior a un ejercicio de fuerza se produce una disminución de la oximetría muscular (Paradis-Deschênes et al., 2016, 2017). Por otro lado, se ha encontrado una revisión de la literatura cuyo objetivo fue revisar el funcionamiento de NIRS 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 (Gómez-Carmona et al., 2019), en la cual se destaca que protocolos que utilicen principalmente el componente de la fuerza son bastante escasas. En esta revisión sólo se han encontrado cinco estudios que han usado esta tecnología para evaluar la cinética de oxigenación muscular fuerza. Las afirmaciones mencionadas respecto de la escasa información de NIRS y fuerza muscular fortalecen aún más la necesidad de crear nuevo conocimiento en esta área.

En general, el uso de NIRS en estudios relacionados con el entrenamiento de fuerza ha demostrado que cuando se incrementa el número de repeticiones realizadas con cargas sub máximas, existe una restricción en el flujo sanguíneo al músculo efector con una consecuente falta en el aporte de O₂, influenciada por carga y tipo de entrenamiento (Davis et al., 2020; Gómez-Carmona et al., 2020; McManus et al., 2018) además, se sabe que el flujo sanguíneo al cuádriceps está ocluido por encima del 20% de una contracción voluntaria máxima (Schott et al., 1995)

En aspectos más concretos, Tamaki et al. (1994) realizó un análisis cuantitativo de la oxigenación de la hemoglobina del músculo en contracción durante el ejercicio de

levantamiento de pesas del 10RM (curl de bíceps) mediante espectroscopia de infrarrojo cercano, concluyendo que un régimen de entrenamiento que utiliza una carga moderadamente alta y un alto número de repeticiones, y una serie en serie con períodos cortos de descanso, provocó un estado anóxico relativamente prolongado en el músculo con una disminución de HbO₂ y flujo total desoxihemoglobina al principio del ejercicio en un protocolo de 10RM (Tamaki et al., 1994). Por otro lado, otros autores investigaron los efectos agudos y a largo plazo del ejercicio de resistencia de baja intensidad (extensión de rodilla) con movimiento lento y generación de fuerza tónica sobre el tamaño y la fuerza muscular, 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 (Tanimoto & Ishii, 2006). También se ha evidenciado en la literatura que (i) existe un menor tiempo hasta fatiga según se produce un aumento de 1RM y (ii) la saturación de O₂ puede ser diferente según el grupo muscular, sugiriendo que dichas diferencias pueden estar relacionadas con la composición del tipo fibra muscular (Azuma et al., 2000). Otro estudio que enfatizó en intensidad y velocidades de ejecución durante el entrenamiento de fuerza concluyó que existen mayores tiempos de reoxigenación en los ejercicios que trabajan a baja intensidad, sugiriendo que ese retraso puede estar causado por un aumento en las concentraciones de lactato, además de explicar que la reoxigenación retardada parece afectar la respuesta de la GH al ejercicio (Hoffman et al., 2003). Finalmente, en cuanto a tiempos de recuperación, mediante un ejercicio de sentadillas se entregó conocimiento que existen diferencias significativas en el tiempo de recuperación de SmO₂ al realizar este tiempo de forma activa que pasiva, obteniendo mejores resultados de forma activa a baja intensidad (Bastida Castillo et al., 2016).

Dentro de las utilidades importantes que se han estudiado para los NIRS es referente a su capacidad de contribuir en el manejo de fatiga muscular, donde este dispositivo se ha descrito como un método robusto, funcional y no invasivo para monitorear la intensidad del ejercicio y los mecanismos de fatiga cuando se aplica en un escenario de ejercicio real al aire libre (Stöggl & Born, 2021).

7.7.5 Fortalezas y limitaciones del uso de NIRS en ejercicio físico.

Gracias a las publicaciones científicas realizadas en la literatura, NIRS se ha reconocido como una técnica óptica no invasiva, funcional, económica y segura que se caracteriza por una resolución temporal relativamente alta (entre 1 y 10 Hz) que permite medir el curso temporal de cambios de oxigenación muscular (Miranda-Fuentes et al., 2020). Utiliza emisores de luz o diodos láser como fuente de luz y detectores para medir la oxigenación muscular y reconocer variables como: oxihemoglobina (HbO_2), desoxihemoglobina (HHb), hemoglobina total (tHb) ($\text{tHb} = \text{HbO}_2 + \text{HHb}$) y saturación de oxígeno muscular ($\text{SmO}_2 = \text{HbO}_2/\text{tHb}$) (Barstow, 2019). El análisis de los datos obtenidos con estos equipos se puede realizarse posteriormente o de forma directa mediante tecnología inalámbrica de transmisión de datos a softwares de fácil lectura. Finalmente, es importante destacar que del total de datos que un NIRS puede registrar, un 70% provienen de sangre venosa, un 20% de sangre capilar y un 10% de sangre arterial (Gómez-Carmona et al., 2019).

Dentro de las limitaciones que se pueden mencionar en la utilización de estos dispositivos se encuentran: (i) la elección de músculos seleccionado y el sitio de colocación del NIRS puede variar de un músculo a otro y de un sitio a otro, especialmente cuando se evalúan músculos grandes con características heterogéneas en su superficie; por ejemplo, se ha encontrado en la literatura divergencias para VL versus recto femoral del cuádriceps (Koga et al., 2015) o gastrocnemio proximal versus distal (Miura et al., 2001); en esta misma línea se han informado también el caso de la cabeza medial del músculo gastrocnemio durante la flexión plantar en bipedestación, en la cual la oxigenación no se distribuyó uniformemente en todo el músculo, pero en cambio fue consistentemente diferente en las áreas proximales y distales; la porción distal tuvo una mayor desoxigenación y una mayor disminución del volumen sanguíneo durante el ejercicio, y tenía mayor oxigenación y aumento del volumen sanguíneo en comparación con la porción proximal (Hajime, 2013), razón por la cual, se debe tener especial cuidado con el uso de un sólo sitio para predecir las respuestas de todo el músculo o la extremidad (Miranda-Fuentes et al., 2021).

Por otra parte, también se han apreciado dificultad de lectura de estos dispositivos en (ii) sujetos con piel de pigmentación oscura (aumento de la concentración de melanina), esto puede reducir la señal emitida por el dispositivo (Wassenaar & Van den Brand, 2005). Por otro lado, (iii) el grosor del tejido adiposo en el músculo esquelético interfiere con los resultados obtenidos por NIRS al reducir la contribución relativa del músculo esquelético al dispositivo debido a la absorción reducida por cromóforos musculares (M. Van Beekvelt et al., 2001); más específicamente, se ha visto que la intensidad de la señal para un espesor de grasa subcutánea de 5 mm redujo en ~ 0.2 la señal de NIRS (80% de la señal para 0 mm) con un separación entre fuente y detector de 30-40 mm, y se redujo aún más en 0.3-0.6 con una separación de 15-20 mm fuente-detector (Hamaoka, 2013)

Finalmente, a modo de sugerencias recogidas de algunas de las publicaciones revisadas, se resume que: (i) resultaría interesante describir en detalle la ubicación del optodos utilizando puntos de referencia anatómicos, esto permitirá a otros investigadores replicar los protocolos validados; (ii) utilizar equipos validados; (iii) utilizar un calibrador de pliegues cutáneos o una ecografía muscular o una tomografía computarizada o una resonancia magnética para verificar el la cantidad de tejido adiposo sub cutáneo y (iv) realizar estudios en sujetos con un grosor de tejido adiposo homogéneo para que los resultados sean comparables.

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Aproximación al problema de investigación

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

8. APROXIMACIÓN AL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Actualmente, el entrenamiento de fuerza muscular se utiliza en entornos de ejercicio físico y rehabilitación por sus beneficios comprobados para la salud y el fitness (Chaabene et al., 2020; El-Kotob et al., 2020; García-Hermoso et al., 2018; Jochem et al., 2019; Maestroni et al., 2020) por lo que la OMS ha incluido su práctica dentro de la recomendación de ejercicio físico para la población en general.

Debido a los beneficios evidenciados por la práctica de ejercicio de fuerza muscular, averiguar la respuesta puntual de este tejido resulta fundamental para conocer su comportamiento durante el ejercicio físico. Hoy por hoy, las variables más utilizadas para medir el rendimiento físico son la frecuencia cardíaca, la concentración de lactato en sangre y el consumo máximo de oxígeno (VO_2 max) las cuales responden, principalmente, a parámetros sistémicos, existiendo escasa información específica de la respuesta muscular durante la práctica de ejercicio físico, toda vez que se ha informado que al ejercitar el músculo con ejercicios de alta intensidad se produce un aumento de la presión mecánica intramuscular, sobre todo durante el ejercicio de fuerza, lo que conlleva a una reducción en el flujo sanguíneo que resulta en una hipoxia muscular transitoria, pudiendo interferir en su respuesta durante la práctica física, provocando el reclutamiento temprano de fibras de contracción rápida debido a la aparición de fatiga periférica temprana (Formenti et al., 2018).

Para lograr una comprensión funcional de la respuesta muscular, se ha sugerido estudiar oximetría muscular, variable que se puede obtener de forma continua y no invasiva utilizando métodos de espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS). La oximetría muscular responde a un conjunto de variables relacionadas con los cambios en la oxigenación y hemodinámica en el tejido muscular en función de las características dependientes del O_2 reflejado por la luz infrarroja proporcionada por el NIRS, como es el equilibrio entre el suministro y la demanda de O_2 a través de la hemoglobina oxigenada (HbO_2) y desoxigenada (Hb) en el músculo (Scholkmann & Scherer-Vrana, 2020)

Sin embargo, a pesar que los dispositivos NIRS son comercializados en el mercado existiendo de diferentes marcas y modelos, hasta donde sabemos, aún no se ha encontrado información que indique de manera clara y objetiva los datos de referencia para las variables proporcionadas por NIRS y su posible variación durante el entrenamiento de fuerza muscular en adultos sanos, información que podría mejorar nuestra comprensión de los mecanismos que influyen en el rendimiento físico y la fatiga durante este período.

A la luz de la importancia de los dispositivos NIRS en la determinación de variables que responden a oximetría muscular, se han desarrollado NIRS más pequeños, seguros y no invasivos que permiten conocer resultados en tiempo real, a un costo relativamente bajo. Estos dispositivos analizan datos utilizando tecnología inalámbrica y se ha informado de su validez tanto en reposo como durante el ejercicio (Crum et al., 2017; Mancini et al., 1994). Recientemente, se ha comercializado en el campo del deporte y la ciencia del ejercicio un NIRS de bajo costo llamado *Humon Hex*; la validez y precisión de este NIRS ya se ha publicado (Farzam et al., 2018); sin embargo, aunque la literatura lo ha identificado como un instrumento funcional y válido, aún no se ha reportado su confiabilidad en la evaluación y entrenamiento de la fuerza estática y dinámica.

Por otro lado, aún existe poca información que explique el comportamiento de las variables de oximetría muscular en adultos sanos durante los ejercicios de fuerza estáticos y dinámicos, por lo que existen vacíos en la aplicación y utilización del NIRS y su interpretación como método de control de la carga de trabajo en entrenamientos de fuerza muscular. Resolver las problemáticas expuestas es relevante para monitorear de manera efectiva y confiable un aspecto de la respuesta muscular (oximetría muscular) al entrenamiento de fuerza, especialmente si está variable (su disminución) se encuentra relacionado con la aparición de fatiga muscular durante el ejercicio (Husmann et al., 2018) y ha mostrado una correlación significativa con el estado máximo estable del lactato y la potencia crítica (Belardinelli et al., 1995) optimizando el rendimiento físico del individuo y sus necesidades exactas (Marta I.R. Pereira et al., 2007).

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Objetivos

General y específicos

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

9. OBJETIVO GENERAL

- Determinar los efectos del entrenamiento de fuerza muscular sobre el gasto energético, fatiga y biomarcadores de actividad física en adultos sanos

Con el propósito de dar cumplimiento al objetivo general de la tesis, esta se divide en tres estudios (E1, E2 y E3) con sus respectivos objetivos específicos.

9.1 E1: Cambios en la saturación de oxígeno muscular medidos con espectroscopia inalámbrica de infrarrojo cercano en el entrenamiento de resistencia: una revisión sistemática.

- Informar, mediante una revisión sistemática de la literatura, los valores de referencia iniciales y finales de SmO_2 obtenidos por NIRS durante el entrenamiento de fuerza en adultos sanos.

9.2 E2: Fiabilidad de la espectroscopia de infrarrojo cercano de bajo costo en la determinación de la saturación de oxígeno muscular y la concentración de hemoglobina durante el reposo, la actividad de fuerza estática y dinámica.

- Determinar la confiabilidad de Humon Hex para calcular los valores de SmO_2 y Hgb en reposo y durante las actividades de fuerza isométrica y dinámica utilizando un dinamómetro electromecánico funcional.

9.3 E3: Respuesta aguda de la oxigenación muscular en vastus lateralis: efecto de tres protocolos de ejercicios de fuerza muscular.

- Describir y comparar la respuesta aguda de la oximetría muscular y la concentración de hemoglobina en el VL durante los protocolos de ejercicio de fuerza hasta el fracaso.

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Hipótesis

10. HIPÓTESIS

10.1 Hipótesis E2:

- H0:**
- a) El dispositivo Humon Hex presenta baja fiabilidad para determinar SmO_2 y Hgb en reposo en adultos sanos.
 - b) El dispositivo Humon Hex presenta baja fiabilidad para determinar SmO_2 y Hgb durante ejercicio isométrico en adultos sanos.
 - c) El dispositivo Humon Hex presenta baja fiabilidad para determinar SmO_2 y Hgb durante ejercicio dinámico (concéntrico y excéntrico) en adultos sanos.
- H1:**
- a) El dispositivo Humon Hex presenta aceptable/alta fiabilidad para determinar SmO_2 y Hgb en reposo en adultos sanos.
 - b) El dispositivo Humon Hex presenta aceptable/alta fiabilidad para determinar SmO_2 y Hgb durante ejercicio isométrico en adultos sanos.
 - c) El dispositivo Humon Hex presenta aceptable/alta fiabilidad para determinar SmO_2 y Hgb durante ejercicio dinámico (concéntrico y excéntrico) en adultos sanos.

10.2 Hipótesis E3:

- H0:**
- a) No existen diferencias para la saturación de oxígeno bajo ejercicios de fuerza estáticos y dinámicos (concéntricos y excéntricos)
 - b) No existen diferencias para la concentración de hemoglobina bajo ejercicios de fuerza estáticos y dinámicos (concéntricos y excéntricos)
- H1:**
- a) Existen diferencias para la saturación de oxígeno bajo ejercicios de fuerza estáticos y dinámicos (concéntricos y excéntricos)
 - b) Existen diferencias para la concentración de hemoglobina bajo ejercicios de fuerza estáticos y dinámicos (concéntricos y excéntricos)

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Metodología

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

11. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

11.1 Tipos de estudios

A continuación, se presenta una tabla donde se detalla el tipo de investigación aplicado. (tabla 2)

Tabla 2: Detalle del alcance y diseño de investigación

Estudio	Diseño de investigación
E1	Revisión sistemática.
E2	No experimental, transversal descriptivo (de medidas repetidas).
E3	No experimental, transversal descriptivo.

Observaciones: E1 = estudio 1; E2 = estudio 2; E3 = estudio 3.

11.2 Diseño metodológico

11.2.1 Diseño metodológico para E1

Registro revisión sistemática: Se realizó una revisión sistemática de la literatura siguiendo la lista de verificación de los elementos de notificación preferidos para revisiones sistemáticas y meta análisis (PRISMA) (Moher et al., 2009). El protocolo original fue registrado en el Registro Prospectivo Internacional de Revisiones Sistemáticas (PROSPERO) en noviembre de 2020 (Número de registro: CRD42020221935). Este paso se produjo antes de que se realizaran las búsquedas.

Estrategia de búsqueda: En noviembre de 2020, dos investigadores independientes (CM e IG) buscaron títulos y resúmenes en las bases de datos electrónicas académicas Scopus, PubMed, WOS y SportDiscus utilizando las palabras clave MeSH y no MeSH para la fuerza muscular y la espectroscopia de infrarrojo cercano utilizando operadores booleanos (AND/OR) (Tabla 3). Todos los resultados de la búsqueda se extrajeron e importaron a un administrador de referencias (Mendeley, versión 1.19.4).

Tabla 3: Términos de búsqueda y palabras clave utilizadas en cada base de datos.

Búsqueda 1		Búsqueda 2
"muscle strength" OR "resistance training", OR "strength training".	AND	"near infrared spectroscopy" OR "NIRS" OR "oximetry" OR "muscle oxygenation".

Observaciones: "AND", "OR" = términos booleanos.

Criterio de elegibilidad: Se utilizaron los siguientes criterios de inclusión para seleccionar artículos para la revisión sistemática: (i) sólo artículos completos publicados en inglés en revistas revisadas por pares; (ii) se consideraron estudios cuantitativos, observacionales y experimentales; (iii) estudios realizados en sujetos adultos sanos (mayores de 18 años), ambos sexos, sin distinción de raza, deportistas entrenados recreativamente o de élite con o sin programas de entrenamiento; (iv) como intervención, solo se incluyeron los estudios que utilizaron el entrenamiento de fuerza como una forma de intervención; (v) se consideró la saturación de oxígeno muscular, los estudios fueron monitoreados por NIRS que registrarán los datos previos y posteriores a la intervención; (vi) consideramos el entrenamiento de fuerza como un tipo de programa de ejercicios de fortalecimiento de la fuerza que requiere que los músculos del cuerpo ejerzan fuerza contra algún tipo de resistencia, como pesas o máquinas de pesas.

La búsqueda no tuvo restricciones de fecha de publicación y se excluyeron todos los estudios que (i) se publicaron en un idioma diferente al inglés; (ii) donde no se contó con acceso completo al texto y presentaciones de conferencias, tesis y libros; fueron duplicados, editoriales, artículos de revisión y opiniones de expertos; (iii) los autores principales y / o secundarios de los artículos no respondieron a las solicitudes de correo electrónico para proporcionar información faltante y requerida.

Criterios de selección: Después de una selección inicial de nuestros criterios de inclusión y exclusión y la eliminación de duplicados, tres revisores evaluaron de forma

independiente los artículos mediante la selección de resúmenes (CM, IG, DJ). A continuación, se obtuvo el texto completo de cada artículo y se examinó según los criterios de exclusión. Cualquier desacuerdo entre ellos se resolvió mediante discusión o se solicitó la intervención de un tercer investigador arbitrario. Para mantener un orden correcto y la comunicación en la revisión se utilizó el software online Rayyan ® (disponible gratuitamente en <http://rayyan.qcri.org> ; visitada el 1 de diciembre 2020). Luego de esta primera etapa, se leyeron íntegramente los artículos previamente seleccionados.

Evaluación de calidad metodológica: Dos revisores (DJ y PD) realizaron evaluaciones de calidad independientes utilizando Downs y Black modificada; en caso de diferencias, un tercer investigador (CM) llegó al consenso final. La lista de verificación Downs and Black es un índice con alta consistencia interna y confiabilidad entre evaluadores. Se utilizó una versión modificada de esta escala porque varios ítems no se aplicaban al diseño del estudio. Por lo tanto, se eligieron 15 de 26 ítems. Para esta revisión, los estudios se consideraron de calidad alta, media y baja si cumplían > 75%, 60-75% y <60% de los criterios aplicables, respectivamente (Bonetti et al., 2019) (Tabla 4, Anexo 1).

Extracción de datos: Se utilizó un formulario de Excel para la extracción de datos. De cada manuscrito seleccionado para revisión se consideró la siguiente información: autores, fecha de publicación, tamaño de la muestra, características de los participantes (edad, sexo, masa corporal, nivel de actividad física), tipo de evaluación de la fuerza muscular, músculo (s), protocolo de fuerza, instrumentación y variables NIRS medidas, un protocolo para el uso de NIRS.

Procedimiento para extraer datos: Los datos de algunos artículos expresados en gráficos se identificaron para su revisión utilizando el programa de digitalización WebPlotDigitizer (<https://automeris.io/WebPlotDigitizer/> ; consultado el 3 de enero de 2021). Se ha demostrado en la literatura que los datos extraídos con el software de

digitalización proporcionan estimaciones muy fiables y válidas a partir de la investigación de un sólo caso (Moeyaert et al., 2016)

11.2.2 Diseño metodológico para E2 y E3

Aspectos éticos: Todos los sujetos fueron informados de los procedimientos a utilizar y firmaron un formulario de consentimiento informado por escrito antes de iniciar su participación en el estudio. El protocolo del estudio se adhirió a los principios de la Declaración de Helsinki y fue aprobado por la Junta de Revisión Institucional de la Universidad de Granada (aprobación del IRB: 997 / CEIH / 2019) (Anexo 2).

Participantes: Al presentar el proyecto se indicó que el tamaño de la muestra se determinaría usando un software estadístico (G*Power versión 3.0.10), basado en una potencia de la prueba al 90% y un nivel de significancia estadística al 5%, tamaño del efecto 0.8. La muestra estimada para el estudio correspondería a 45 sujetos y con el fin de anticiparse a posibles abandonos se evaluarían a 54 sujetos. Desafortunadamente, las condiciones sociales en Chile y de salud mundial impidieron contar con la totalidad de los participantes por que lo que, finalmente, se realiza un muestro probabilístico a través de grupo de voluntarios que respetasen los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

Criterios de inclusión E2 y E3: Los criterios de inclusión selectiva fueron: (i) sujetos jóvenes, (ii) ambos sexos (iii) sanos y (iv) tener al menos un año de experiencia en entrenamiento de fuerza.

Criterios de exclusión E2 Y E3: Quedan excluidos del estudio aquellos sujetos (i) con comorbilidades médicas tales como (enfermedad cardiorrespiratoria crónica y sujetos con hábito tabáquico) y/o alguna condición musculoesquelética aguda o crónica que impidiera la realización de las actividades.

Participantes E2 y E3: Inicialmente, se reclutaron veintitrés (23) sujetos para los estudios (cinco mujeres y dieciocho hombres) de los cuales siete sujetos (cinco mujeres y dos hombres) fueron excluidos. Finalmente, dieciséis (16) hombres sanos se ofrecieron como voluntarios para participar en este estudio (media \pm desviación estándar (DE): edad = 36.12 ± 6.39 años; masa corporal = 80.37 ± 10.03 kg; altura corporal = 1.73 ± 0.06 m; índice de masa corporal = 26.65 ± 2.73 kg/m²; porcentaje de grasa corporal = 23.45 ± 4.85 %; masa de músculo esquelético = 34.97 ± 3.69 kg y masa de músculo esquelético del miembro inferior = 18.64 ± 2.17 kg).

11.3 Procedimientos

E1 y E2: Los sujetos asistieron a dos sesiones de familiarización, con un intervalo de 48 a 72 horas, una semana antes de la primera sesión experimental. Para cada sesión experimental, los participantes fueron invitados al laboratorio después de un ayuno de cuatro horas, descansados y sin haber consumido cafeína 24 horas antes de la sesión experimental. Todas las evaluaciones se realizaron en el laboratorio de investigación de la universidad a la misma hora del día para cada sujeto (± 1 h) y en condiciones ambientales similares ($\approx 22^\circ\text{C}$ y $\approx 60\%$ de humedad). La primera sesión experimental (figura 5) comenzó con la recopilación de datos de composición corporal. Posteriormente, se colocó Humon Hex en el punto medio del muslo de la pierna dominante, entre la espina ilíaca anterosuperior y el borde superior de la rótula, y se colocó de forma segura con un cierre de velcro (Humon., n.d.) (Figura 6a). Una vez que se colocó el dispositivo, cada sujeto tuvo un período de descanso de 15 minutos acostado de espaldas en una camilla

E2: La segunda sesión experimental de E2 (re-test) se realizó 48 horas después del momento de la prueba, se repitieron todos los protocolos que registraron SmO₂ y Hgb

en la primera sesión, como el tiempo de reposo, el calentamiento y todos los protocolos de fuerza dinámica.

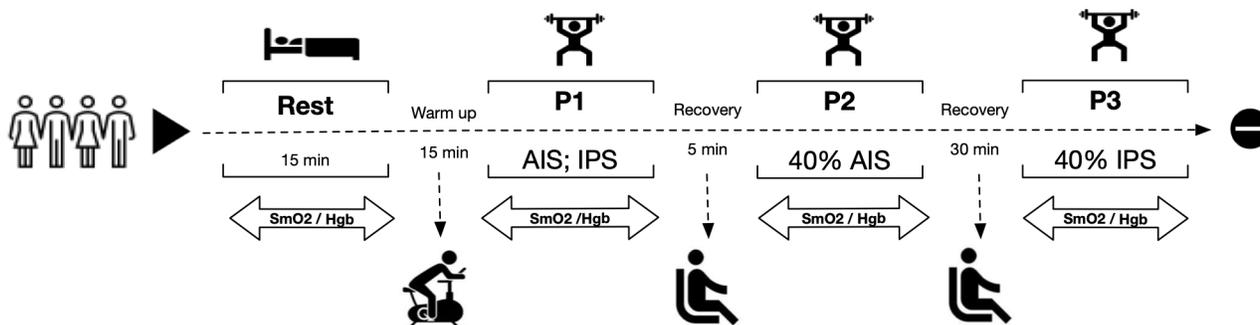


Figura 5. Representación gráfica de la sesión experimental del proyecto de investigación. Rest = descanso; P1 = ejercicio de fuerza isométrica; AIS = fuerza isométrica media; IPS = fuerza isométrica pico; P2 = Fuerza dinámica con carga inicial 40% AIS; P3 = fuerza dinámica con carga inicial 40% IPS; SmO₂ = saturación de oxígeno muscular; Hgb = concentración de hemoglobina.

Protocolos de fuerza muscular para E2 y E3.

Para todos los protocolos de fuerza estática y dinámica los participantes se sentaron en una silla especialmente designada y fijaron una polea en el área distal de su pierna dominante para proporcionar los valores FEMD (Figura 6b). Se llevaron a cabo tres protocolos para las evaluaciones de fuerza: fuerza isométrica (P1), fuerza dinámica I (P2) y fuerza dinámica II (P3). Las instrucciones para realizar cada uno de los protocolos de fuerza dinámica fueron ejecutar extensiones de rodilla hasta 180°, las cuales tendrían incrementos de carga de dos kilogramos (kg) desde la primera repetición hasta lograr el fallo muscular.

- P1** Se pidió a cada sujeto que realizara tres series de 8 segundos de fuerza isométrica máxima, con un descanso de 60 segundos entre cada serie; la instrucción para cada sujeto fue realizar la extensión de rodilla a la máxima intensidad posible. En este protocolo, se registraron la fuerza isométrica media (AIS) y fuerza máxima (IPS) de cada repetición. Descanso de cinco minutos.
- P2** El cual requirió la aplicación de la fuerza máxima con una carga inicial del 40% de AIS. Descanso de 30 minutos.

P3 Requirió la aplicación de la resistencia máxima con una carga inicial del 40% de IPS.

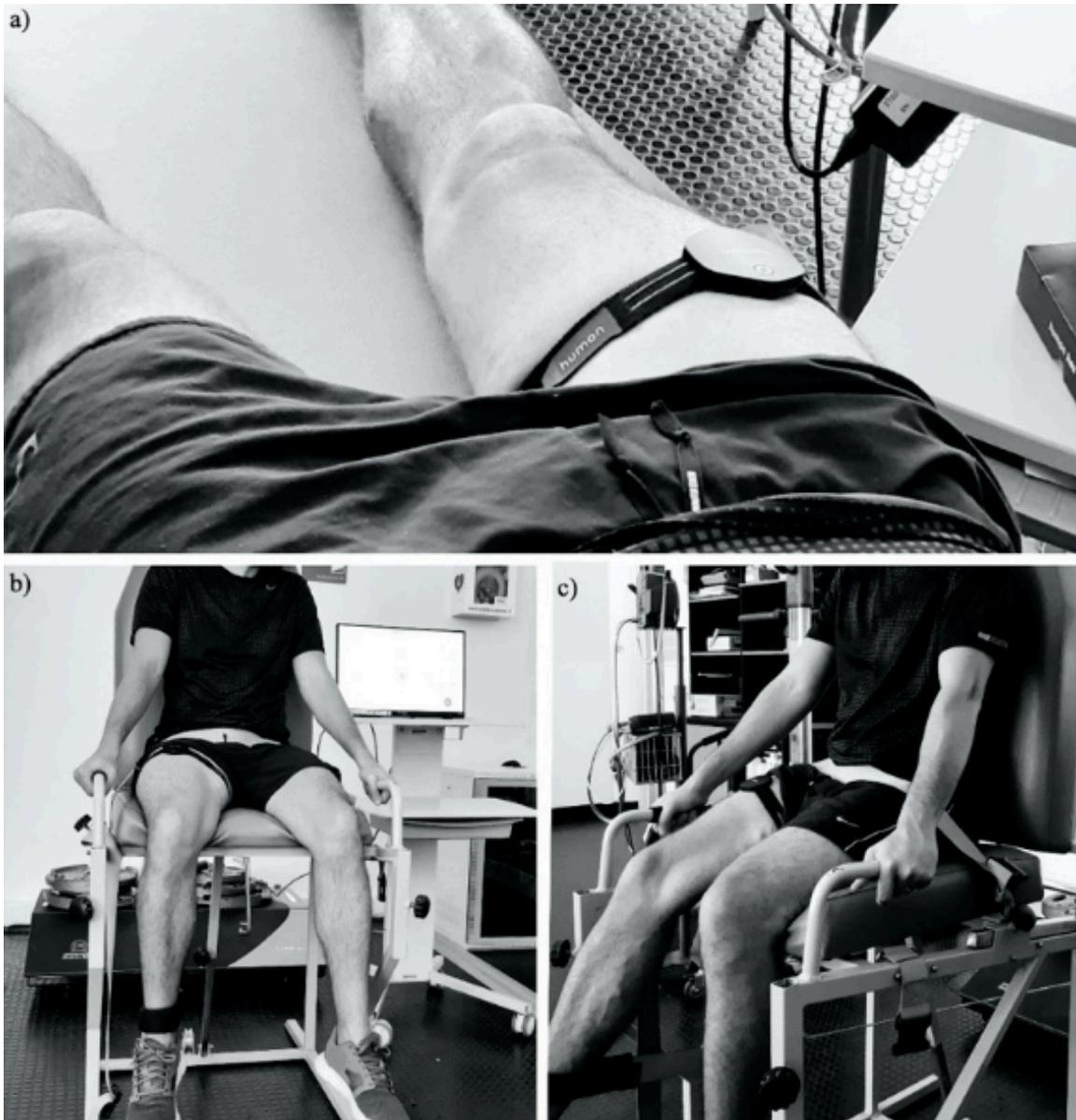


Figura 6. Representación gráfica del posicionamiento del NIRS y DEMF.

11.4 Equipamiento

- Se utilizó un estadiómetro para medir la altura corporal (Seca 202; Seca Ltd., Hamburgo, Alemania) y un bioimpedanciómetro para medir la composición corporal (InBody 770, Cerritos, CA, EE. UU.).
- Se registraron SmO₂ y Hgb usando un NIRS (Humon Hex, Dynometrics Inc., Boston, MA, EE. UU.), dispositivo de 60,5 x 57 x 13,8 mm con un peso de 32 g. Su carcasa de plástico está ligeramente curvada para permitir un fácil contacto con la superficie del cuádriceps.
- Finalmente, la fuerza dinámica se evaluó utilizando un dinamómetro electromecánico funcional (DEMF) (Dynamometer, Model Research, Granada, España), que se informó como un instrumento válido y confiable para evaluar esta capacidad en las extremidades superiores (Chamorro et al., 2018; Daniel Jerez-Mayorga et al., 2019; Martínez-García et al., 2020; A. Rodríguez-Perea et al., 2019; Á. Rodríguez-Perea et al., 2021b) e inferiores (Vega et al., 2018).

11.5 Extracción de datos

Humon Hex se vincula, a través de Bluetooth, a un teléfono inteligente en el que una aplicación personalizada (Dynamometrics Inc, Boston, MA, EE. UU., Recuperada de <http://humon.io>) muestra el progreso del entrenamiento en tiempo real. El Humon sólo mide la intensidad de la luz en tres separaciones y dos longitudes de onda, por lo tanto, para estimar sus resultados, es necesario asumir un coeficiente de dispersión fijo. Los algoritmos utilizados para determinar los parámetros hemodinámicos no han sido publicados y son propiedad de Dynometrics Inc (Farzam et al., 2018). Los datos totales registrados para cada sesión experimental se extrajeron a una hoja de cálculo del sitio web de Humon Hex. En el formulario de registro de cada participante se anotaron los segundos de inicio y finalización de cada protocolo obtenido de la aplicación móvil. Para el análisis de las variables SmO₂ y Hgb se utilizó el valor promedio obtenido de cada protocolo de fuerza isométrica y dinámica.

En el caso de los datos extraídos del DEMF, se exportaron desde el dispositivo a una hoja de cálculo personalizada utilizando los valores promedio y máximo para su posterior análisis.

11.6 Análisis estadístico

E2: Los datos descriptivos se presentan como media (Me) \pm desviación estándar (DE). La distribución normal de los datos se confirmó mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Se utilizó la prueba t de muestras pareadas y las diferencias de medias estandarizadas (tamaño del efecto de Cohen (ES)) para comparar la magnitud de la carga, el número de repeticiones, SmO₂ y Hgb entre ambas sesiones de prueba. Los criterios para interpretar la magnitud de la ES fueron los siguientes: nulo (<0.20), pequeño (0.2 - 0.59), moderado (0.60 - 1.19), grande (1.20 - 2.00) y muy grande (> 2.00) (Hopkins et al., 2009). La confiabilidad absoluta se evaluó mediante el error estándar de medición (SEM) y el coeficiente de variación (CV), mientras que la confiabilidad relativa se evaluó mediante el ICC, modelo 3.1. Se utilizaron los siguientes criterios para determinar la fiabilidad aceptable (CV \leq 10%, ICC \geq 0.80) y alta (CV \leq 5%; ICC \geq 0.90) (James et al., 2017). La relación entre dos CV se utilizó para comparar la confiabilidad de SmO₂ y Hgb entre las diferentes condiciones experimentales. Se consideró que la menor proporción importante de CV era superior a 1.15 (Fulton et al., 2009). El sesgo sistemático se examinó mediante gráficos de Bland-Altman. Finalmente, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (*r*) para cuantificar la correlación de SmO₂ y Hgb entre ambas sesiones de prueba. Los criterios para interpretar la magnitud de *r* fueron nulo (0.00 - 0.09), pequeño (0.10 - 0.29), moderado (0.30 - 0.49), grande (0.50 - 0.69), muy grande (0.70 - 0.89), casi perfecto (0.90 - 0.99) y perfecto (1.00) (Hopkins et al., 2009). Para todos los cálculos estadísticos, se utilizó un intervalo de confianza del 95%. La significación estadística se aceptó p <0.05. Todas las evaluaciones

de fiabilidad se realizaron mediante una hoja de cálculo personalizada (Hopkins, 2015), mientras que otros análisis estadísticos se realizaron utilizando el software JASP (versión 0.9.1.0, <http://www.jasp-stats.org>).

E3 Los datos descriptivos se presentan como media (Me) y desviación estándar (DE). Se confirmó la distribución normal de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de las varianzas prueba de Levene, ($p > 0.05$). Para el análisis principal, se realizó un análisis de varianza de medidas repetidas (ANOVA) con el análisis Post-hoc de Bonferroni. La corrección de Greenhouse-Geisser se utilizó cuando se violó la prueba de esfericidad de Mauchly. Se calculó el omega al cuadrado (ω^2) para el ANOVA donde los valores de los tamaños del efecto 0.01; 0.06 y por encima de 0.14 se consideraron pequeños, medianos y grandes, respectivamente (Cohen, 1988). La significación estadística se aceptó $p < 0.05$. Para los análisis estadísticos se utilizó el paquete estadístico JASP (versión 0.14.1).

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Resultados

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

12. RESULTADOS

12.1 Resultados E1

Evaluación de calidad metodológica: Los puntajes de evaluación de la calidad variaron entre 44% y 63% (7 a 10 de 16 puntos) con una media del 52% (Tabla 4). Un artículo se calificó como de alta calidad y tres artículos se calificaron como de baja calidad. Todos los estudios recibieron puntos para los ítems 1, 2, 3, 6, 7 (informes) y 18, 20 (validez interna). Por otro lado, ninguno de los artículos puntuó positivamente en los ítems 11, 12 (validez externa) y 14, 15, 25 (validez interna).

Tabla 4: Evaluación de la calidad metodológica basada en la lista de verificación Downs y Black modificada.

Author	Elementos de la lista de verificación Downs and Black modificada															Ptge total	Total %
	Reportando							Validez externa		Validación interna							
	1	2	3	5	6	7	10	11	12	14	15	16	18	20	25		
(Alvares et al., 2020)	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	10	63
(Gómez-Carmona et al., 2020)	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	8	50
(Davis et al., 2020)	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	7	44
(Timón et al., 2018)	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	8	50
Total para cada ítem	4	4	4	2	4	4	2	0	0	0	0	1	4	4	0		
% por cada ítem	100	100	100	25	100	100	25	0	0	0	0	13	10	100			

Estudios incluidos y características de los estudios: Finalmente, cuatro artículos cumplieron con los criterios de inclusión establecidos para esta revisión (figura 7) y, en total, informaron los resultados del trabajo con NIRS durante ejercicios de fuerza muscular de 42 sujetos con una edad que osciló entre el rango de 21 y 23 años, donde correspondía el 85.71% a hombres y 14.28% a mujeres. Los sujetos reclutados por los estudios eran físicamente activos, tenían entrenamiento de fuerza muscular y estaban sanos (Tabla 5, figura 7).

Tabla 5: Características de los participantes de los estudios seleccionados para la revisión.

Author	n y sexo (masculino/femenino)	edad (Me ± DE)	Peso (kg)	Estatura (m)	Nivel de Actividad física
(Alvares et al., 2020)	12/NR	NR	NR	NR	Físicamente activo
(Gómez-Carmona et al., 2020)	12/NR	21.63 ± 1.17	77.76 ± 8.77	1.81 ± 0.08	Físicamente activo
(Davis et al., 2020)	6/5	23.7 ± 1.4	NR	NR	Físicamente activo
(Timón et al., 2018)	12/NR	21.1 ± 2.1	72.2 ± 7.2	1.77 ± 3.8	Saludable

NR = not registered.

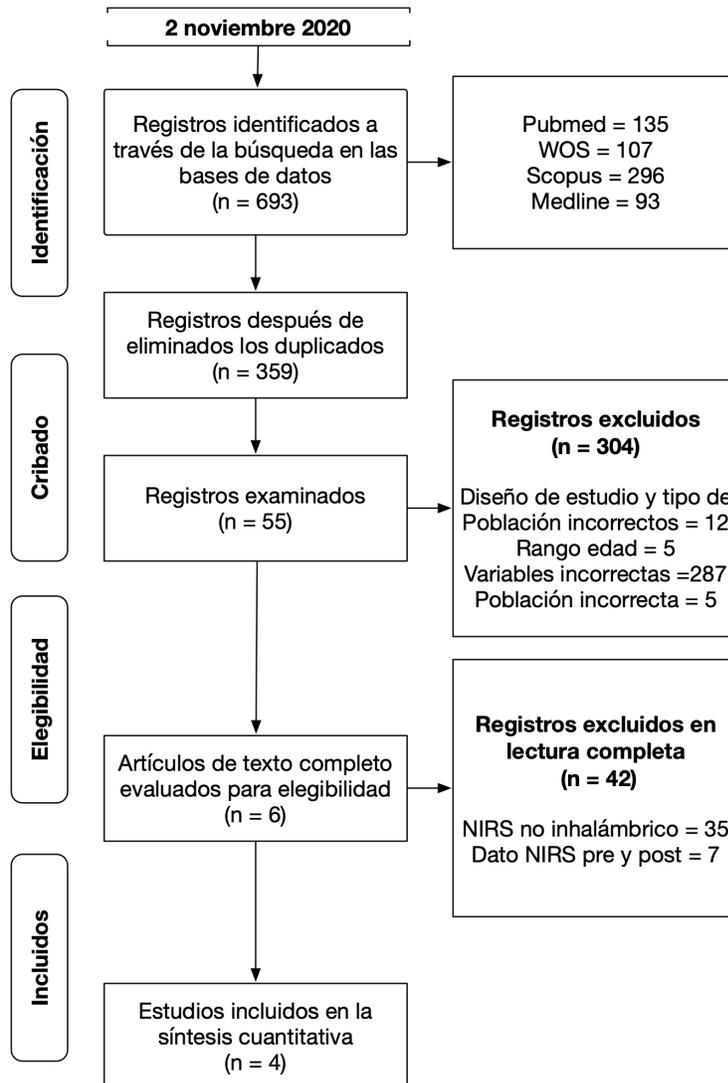


Figura 7: Resumen estrategia de búsqueda y el proceso de selección de estudios.

En cuanto a los resultados de la evaluación de la fuerza muscular, tres de los cuatro estudios consideraron la evaluación de 1 repetición máxima (RM) para la prescripción de carga de sus protocolos y un estudio evaluó la máxima contracción voluntaria. Las cuatro publicaciones evaluaron las extremidades inferiores mediante modalidades de ejercicio tipo *Squat*, sin superar el 75% de carga con respecto al tipo de protocolo utilizado.

Tres de los cuatro artículos utilizaron equipos NIRS de la marca MOXY en diferentes modelos, y un estudio utilizó PortaMon; de forma transversal, todos los artículos entregaron resultados en %, aunque cada uno por separado también proporcionó otras unidades de medida adicionales; el VL es el sitio preferido para colocar los dispositivos NIRS en los cuatro estudios revisados.

Finalmente, los datos de SmO_2 (%) durante los ejercicios de fuerza muscular informados variaron antes del protocolo, entre (rango) 68.07 – 77.9 %, y después del entrenamiento (rango) 9.50 – 46.09%.

Tabla 6: Resumen de los resultados de los estudios que investigan la oximetría muscular antes y fuerza.

Autor(s)	Medida / Instrumento para evaluar la fuerza muscular	Protocolo de fuerza muscular para NIRS	Dispositivo NIRS	Unidad de medida	Protocolo NIRS	SmO ₂ Pre or min* (%)	Sm Post max*
(Alvares et al., 2020)	Dinamómetro isocinético (Humac Norm, CSMi Medical Solutions, USA).	1x6 MVC a baja velocidad (SV) (30 * s ⁻¹) y 1x6 MVC a alta velocidad (FV) (180 * s ⁻¹), con 30 minutos de descanso entre series.	PortaMon, Artinis Medical Systems	%; μM*s ⁻¹	Sobre VL (la mitad de la distancia entre la parte superior de la rótula y el trocánter del fémur).	68.07 ± 2.93 (SV); 66.76 ± 3.52 (FV)	46.0 45.53** 55.0 53.48*
(Gómez-Carmona et al., 2020)	1RM estimado por velocidad. A cable-extension linear velocity transducer (ChronoJump, Barcelona, Spain).	Ejercicio de sentadillas (4 series de 4 a 16 repeticiones al 60-75% 1RM y 40-80% de LE).	MOXY, Hutchinson, MO	%	Sobre VL (a 15 cm del borde superior de la rótula).	Range: 77.30 – 76.34	Range: 7.3
(Davis et al., 2020)	1 RM	3 series de 15 repeticiones al 70% de su peso de 1 RM tanto para sentadillas traseras (BS) como delanteras (FS).	MOXY 3, Firmware 1.1	%	Sobre VL, aproximadamente 94 mm por encima de la rótula.	77.9 – 68.6 (BS), 83.3 – 67.9 (FS)	24.7 – (BS), 22.2
(Timón et al., 2018)	1RM estimado de 1-5 RM con la ecuación predictive de Brzycki's.	Dos protocolos: sentadilla con barra 3x8 (BS) con 3 min de descanso entre cada serie; 3x8 repeticiones de esfuerzo máximo y 3 min de descanso entre series de sentadillas YoYo® con volante de inercia (FS).	MOXY, profusa INC, South San Francisco, USA)	%, g/dL	Vientre del músculo VL, 12 cm por encima del epicóndilo lateral de la pierna derecha.	73.6 – 75.4 (BS); 76.5 – 74.7 (FS)	19.9 – (BS); 12.2

Observaciones: datos presentados como Me ± DE o rango; MVC = máxima contracción voluntaria; VL= músculo vastus lateralis; NR= no registrado; WebPlotDigitalizer. *min or pre = valor mínimo o pre ejercicio μM = Micromolar; % = porcentaje; g/dL = gramos por decilitro.

12.2 Resultados E2

No se observaron diferencias significativas para la carga promedio durante las condiciones de fuerza isométrica y dinámica entre el test y el retest a excepción de la manifestación de IPS en P3 ($p = 0.462$; $ES = 0.56$) (Tabla 7).

Tabla 7. Comparación de la carga promedio, la carga máxima y el número de repeticiones durante las condiciones de fuerza isométrica y dinámica entre ambas sesiones de prueba.

Condición	Variable	Sesión 1 (me \pm DE)	Sesión 2 (me \pm DE)	Valor p	ES (95% IC)
P1	AIS (kg)	50.7 \pm 9.6	49.7 \pm 9.1	0.545	0.15 (-0.34, 0.64)
	IPS (kg)	58.7 \pm 11.8	56.3 \pm 9.9	0.074	0.47 (-0.04, 0.99)
P2	AIS (kg)	26.4 \pm 7.4	27.0 \pm 6.8	0.462	0.18 (-0.68, 0.30)
	IPS (kg)	46.6 \pm 7.1	47.4 \pm 7.4	0.402	0.21 (-0.70, 0.28)
	Nº de repeticiones	10.2 \pm 2.3	10.6 \pm 2.3	0.249	0.29 (-0.79, 0.20)
P3	AIS (kg)	29.0 \pm 7.6	29.2 \pm 7.2	0.792	0.06 (-0.55, 0.42)
	IPS (kg)	47.0 \pm 9.3	50.0 \pm 7.6	0.040	0.56 (-1.08, 0.02)
	Nº de repeticiones	8.8 \pm 2.9	9.8 \pm 2.5	0.013	0.69 (-1.23, 0.13)

Observaciones: AIS = fuerza isométrica media; IPS = fuerza isométrica pico; DE = desviación estándar; ES = Cohen's d effect size ([higher mean - lower mean]/SD both); 95% IC = intervalo de confianza 95%.

La figura 8 (a y b) muestra el comportamiento de SmO_2 (%) y Hgb (g/dL) de un sujeto representativo de la muestra bajo las diferentes condiciones experimentales sometidas.

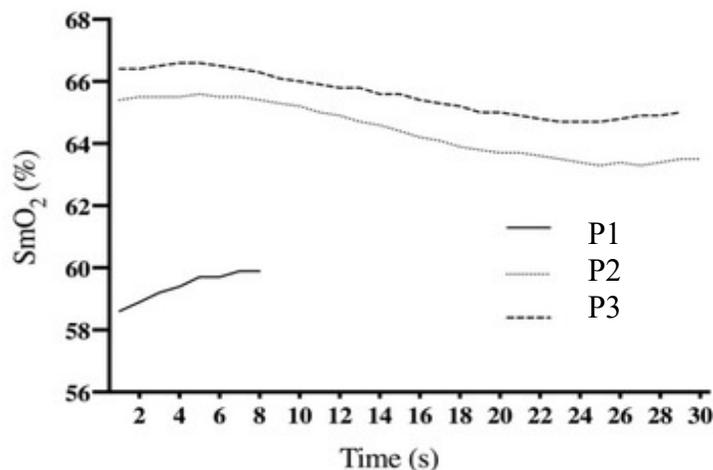


Figura 8a. Comportamiento de SmO_2 en un individuo representativo en reposo y durante condiciones de fuerza isométrica y fuerza dinámica.

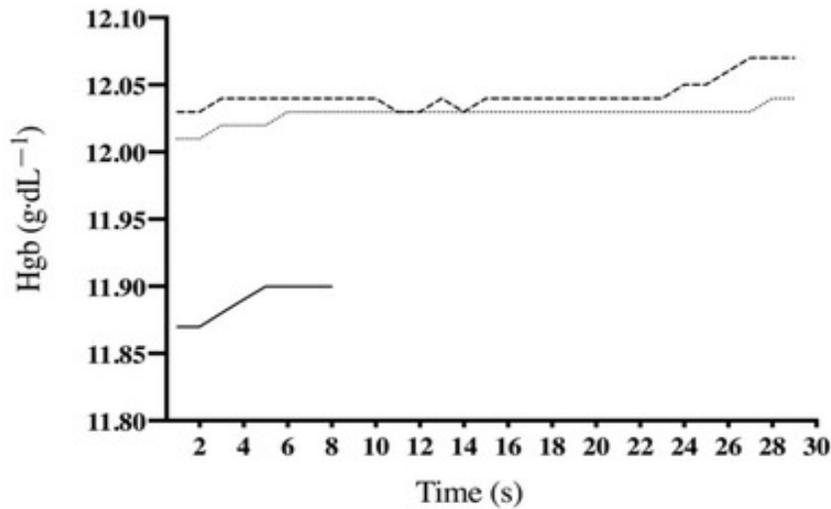


Figura 8b. Comportamiento de Hgb en un individuo representativo en reposo y durante condiciones de fuerza isométrica y fuerza dinámica.

No se encontraron diferencias significativas para SmO_2 y Hgb durante las diferentes condiciones experimentales entre ambas sesiones de prueba ($p = 0.249$; $ES = 0.34$), excepto para SmO_2 bajo condición de fuerza isométrica ($p = 0.002$; $ES = 0.38$). La confiabilidad absoluta fue de aceptable a alta para SmO_2 ($SEM = 6.75\%$, $CV = 9.69\%$) y alta para Hgb ($SEM = 0.40 \text{ g}\cdot\text{dL}^{-1}$, rango de $CV = 3.25\%$) en las diferentes condiciones experimentales, excepto para SmO_2 en condiciones de fuerza dinámica siguiendo el P1 ($SEM = 7,17\%$, $CV = 10,6$). La confiabilidad relativa fue alta para SmO_2 en reposo y condiciones de fuerza isométrica (rango $ICC = 0.90-96$) así como para Hgb en condiciones de fuerza isométrica ($ICC = 0.96$), mientras que se observó una confiabilidad relativa inaceptable en las condiciones restantes ($ICC = 0.65$) (Tabla 2). Con respecto a las comparaciones de confiabilidad, (i) la condición de fuerza isométrica proporcionó para SmO_2 y Hgb más confiabilidad que las condiciones de reposo y fuerza dinámica ($CVratio = 1.90$), (II) la condición de reposo proporcionó la SmO_2 y Hgb con mayor confiabilidad que las condiciones de fuerza dinámica ($CVratio = 1.39$) y, finalmente, (iii) la condición de fuerza dinámica siguiendo el P2 proporcionó al Hgb con mayor confiabilidad que la condición de fuerza dinámica siguiendo el P1 ($CVratio = 1.19$). Los gráficos de Bland-Altman revelan un mayor sesgo sistemático para SmO_2 durante el P2 (figura 9).

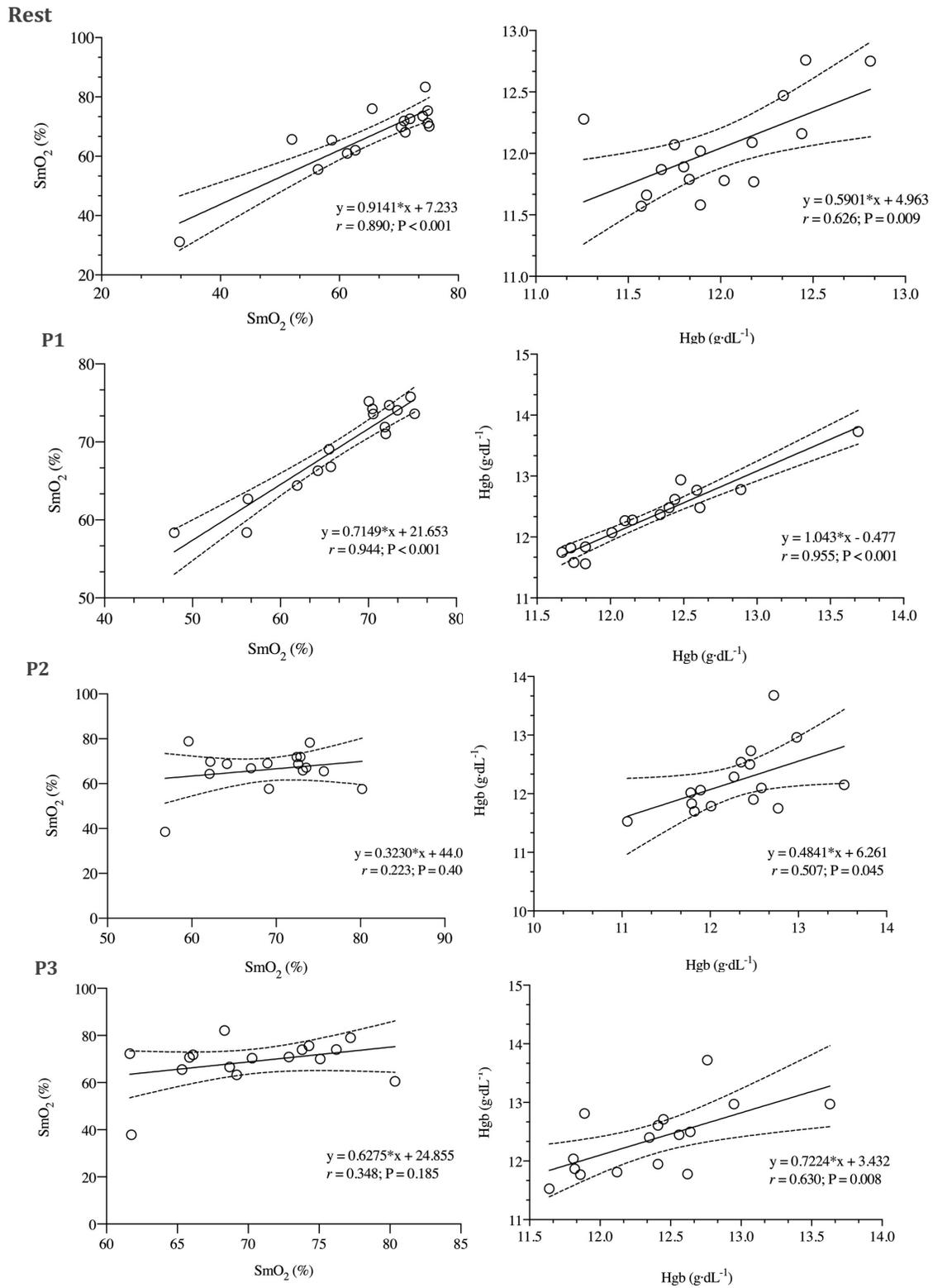


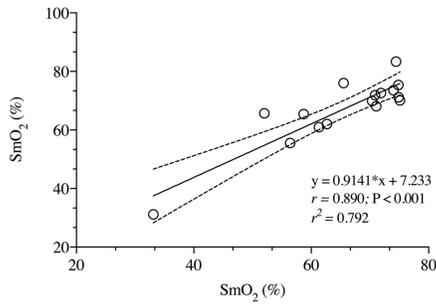
Figura 9. Gráficos de Bland-Altman de test-retest para SmO₂ (%) y Hgb (g·dL⁻¹).

Tabla 8. Fiabilidad de Humon Hex NIRS para la determinación de SmO₂ y Hgb en reposo, protocolos de fuerza isométrica y dinámica I y II.

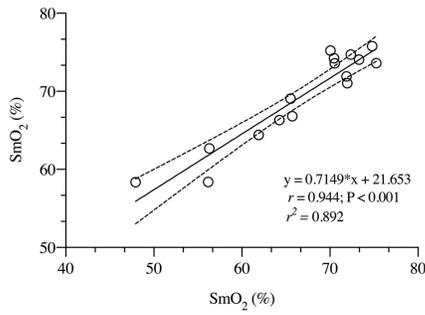
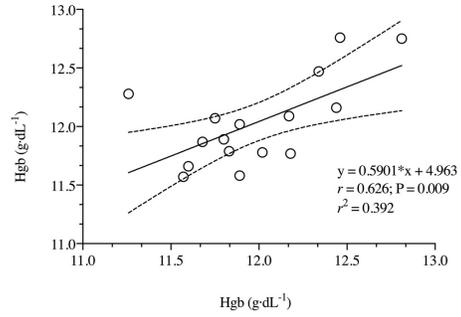
	Condición	Sesión 1 (me ± DE)	Sesión 1 (me ± DE)	Valor <i>p</i>	ES (95% IC)	SEM (95% IC)	CV (95% IC)	ICC (95% IC)
SmO ₂ (%)	Rest	65.5 ± 11.3	66.7 ± 11.65	0.25	0.14 (-0.84, 1.12)	3.81 (2.85, 5.90)	5.76 (4.24, 8.91) [†]	0.90 (0.75, 0.97)
	P1	66.8 ± 7.8	69.4 ± 5.9	0.00	0.38 (-0.61, 1.36)	2.08 (1.54, 3.22)	3.03 (2.24, 4.69) [*]	0.92 (0.79, 0.97)
	P2	69.0 ± 6.5	66.3 ± 9.4	0.30	0.34 (-1.32, 0.65)	7.17 (5.30, 11.1)	10.6 (7.83, 16.4)	0.22 (-0.29, 0.64)
	P3	70.4 ± 5.5	69.1 ± 10.0	0.57	0.17 (-1.14, 0.82)	6.75 (4.99, 10.5)	9.69 (7.15, 15.0)	0.32 (-0.20, 0.69)
Hgb (g·dL ⁻¹)	Rest	12.0 ± 0.4	12.0 ± 0.4	0.55	0.13 (-0.85, 1.10)	0.24 (0.18, 0.37)	1.97 (1.46, 3.05) [†]	0.65 (0.25, 0.86)
	P1	12.3 ± 0.5	12.4 ± 0.6	0.25	0.10 (-0.80, 1.16)	0.12 (0.09, 0.19)	0.98 (0.72, 1.51) [*]	0.96 (0.89, 0.99)
	P2	12.3 ± 0.6	12.2 ± 0.6	0.54	0.16 (-1.14, 0.81)	0.40 (0.29, 0.62)	3.25 (2.20, 5.04)	0.54 (0.70, 0.81)
	P3	12.4 ± 0.5	12.4 ± 0.6	0.99	0.00 (-0.98, 0.98)	0.34 (0.25, 0.52)	2.74 (2.02, 4.23) [#]	0.65 (0.25, 0.86)

Observaciones DE = desviación estándar; ES = tamaño del efecto d de Cohen; SEM = error estándar de medición; CV = coeficiente de variación; ICC = coeficiente de correlación intraclase; IC del 95% = intervalo de confianza del 95%. Los números en negrita indican una confiabilidad inaceptable (CV > 10%, ICC < 0.80); * = significativamente más confiable que el resto y las condiciones de fuerza dinámica; † = significativamente más confiable que las condiciones de fuerza dinámica; # = significativamente más confiable que la condición de fuerza dinámica siguiendo el P1 (CVratio [valores CV más altos / valores CV más bajos] > 1,15).

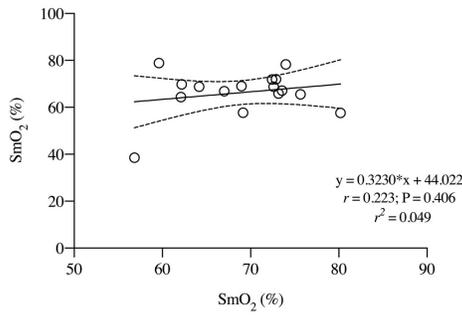
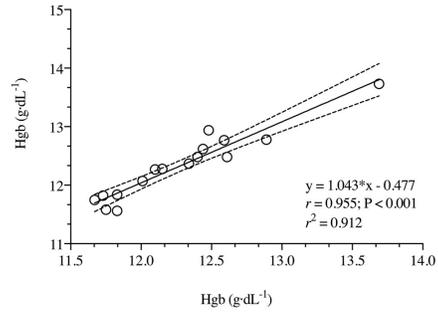
Finalmente, la magnitud *r* para SmO₂ y Hgb fue de grande a casi perfecta durante las diferentes condiciones experimentales (*r* = 0.507; *p* = 0.045), excepto para SmO₂ bajo condiciones de fuerza dinámica (rango *r* = 0.348; *p* = 0.185) (figura 10).



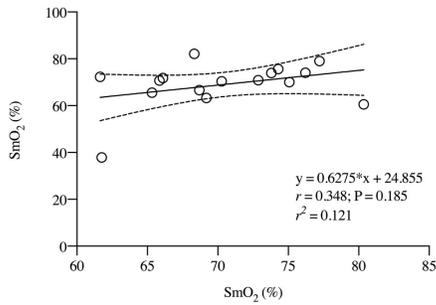
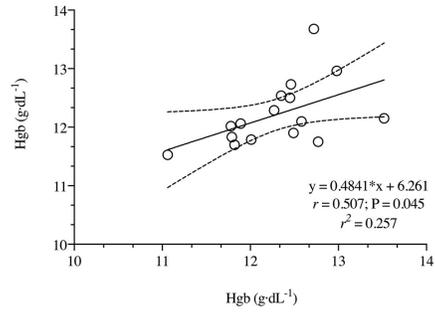
Rest



P1



P2



P3

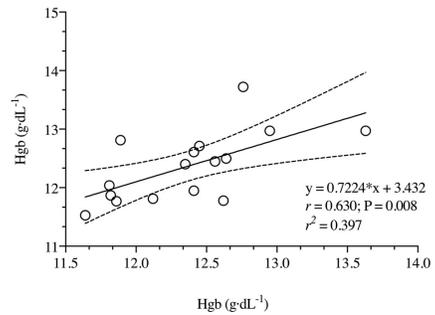


Figura 10. Relación entre SmO₂ y Hgb en reposo y durante las condiciones de fuerza isométrica y fuerza dinámica entre ambas sesiones de prueba.

12.3 Resultados E3

La fuerza media desarrollada durante el protocolo P1 fue (56.31 ± 9.90 kg). Se observaron niveles máximos de SmO₂ ($69.05 \pm 9.95\%$) y Hgb (12.36 ± 0.58 g/dL) durante P3 (Tabla 9).

Tabla 9. Comportamiento de SmO₂, Hgb y fuerza durante todos los protocolos de fuerza

Condición	Variable	Fuerza (kg)	SmO ₂ (%)	Hgb (g/dL)
Rest	-	-	66.72 ± 12.06	12.03 ± 0.37
P1	AIS	49.67 ± 9.13	69.45 ± 6.96	12.36 ± 0.56
	IPS	56.31 ± 9.90		
P2	AIS	27.00 ± 6.77	66.31 ± 9.38	12.22 ± 0.55
	IPS	47.39 ± 7.41		
	Nº repeticiones	10.6 ± 2.3		
P3	AIS	29.15 ± 7.15	69.05 ± 9.95	12.36 ± 0.58
	IPS	50.00 ± 7.61		
	Nº repeticiones	9.8 ± 2.5		

Observaciones. Datos expresados como media \pm desviación estándar. Abreviaturas: Rest = reposo; P1 = fuerza isométrica; P2 = fuerza dinámica con carga inicial 40% AIS; P3 = fuerza dinámica con carga inicial 40% IPS; SmO₂ = saturación de oxígeno muscular; Hgb = concentración de hemoglobina (g/dL).

No hubo diferencias significativas entre las cargas promedio de los respectivos protocolos para SmO₂: (F1; 25 = 2.246, P = 0.135, $\omega^2 = 0.011$ (Figura 11a).

Los resultados en Hgb muscular difirieron significativamente entre el reposo y P1 y el reposo y P3 (F 2; 30 = 7.353; p = 0.003; $\omega^2 = 0.055$) (Figura 11b). Los análisis post-hoc que utilizaron la corrección de Bonferroni revelaron que los niveles de concentración de hemoglobina aumentaron significativamente entre el reposo y P1 (diferencia media = 0,334, P = 0.011) y entre el reposo y P3 (diferencia media = 0.336; p = 0.023) (Tabla 10).

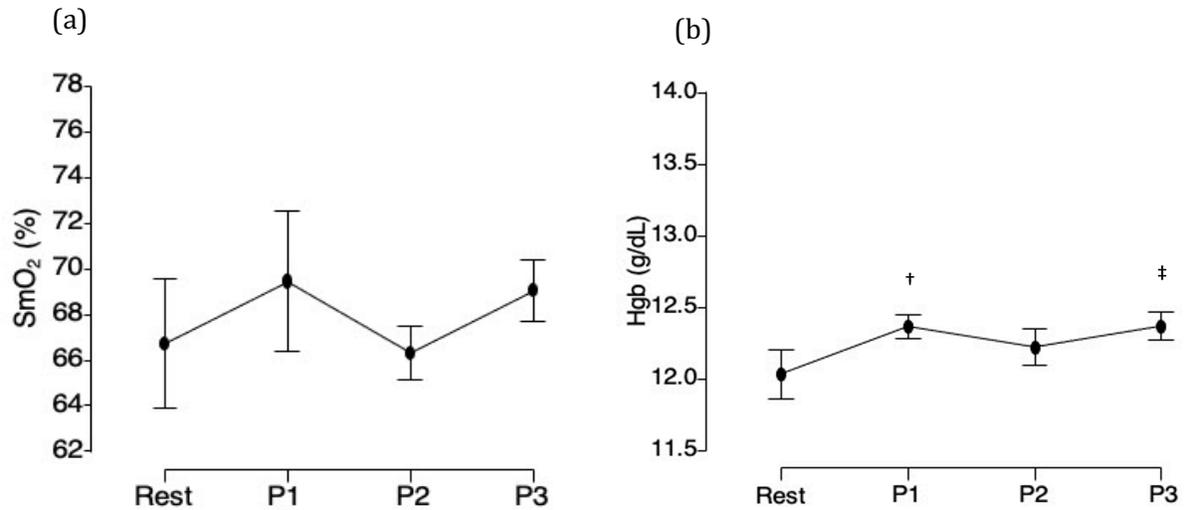


Figura 11. (a) Diferencias de saturación de oxígeno muscular entre los protocolos de reposo y fuerza muscular. Observaciones. Descanso = reposo; P1 = fuerza isométrica; P2 = fuerza dinámica con carga inicial 40% AIS; P3 = fuerza dinámica con carga inicial 40% IPS; SmO₂ = saturación de oxígeno muscular (%). **(b)** Diferencias de concentración de hemoglobina entre los protocolos de reposo y fuerza muscular. Abreviaturas: Descanso = reposo; P1 = fuerza isométrica; P2 = fuerza dinámica con carga inicial 40% AIS; P3 = fuerza dinámica con carga inicial 40% IPS; SmO₂ = saturación de oxígeno muscular; † = Diferencias significativas entre REST versus P1; ‡ = Diferencias significativas entre REST versus P3.

Tabla 10: Análisis post-hoc de Bonferroni de concentración de hemoglobina.

Condición		Diferencia de media	Cohens'd	Valor p
P1	P2	0.145	0.563	0.238
	P3	-0.002	-0.012	1.000
	Rest	0.334	0.948	0.011*
P2	P3	-0.147	-0.560	0.243
	Rest	0.189	0.423	0.667
P3	Rest	0.336	0.855	0.023*

Observaciones. Rest = reposo; P1 = fuerza isométrica; P2 = fuerza dinámica con carga inicial 40% AIS; P3 = fuerza dinámica con carga inicial 40% IPS; * P < 0.05.

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

Discusión

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

13. DISCUSIÓN

La presente investigación tiene como objetivo general determinar los efectos del entrenamiento de fuerza muscular sobre el gasto energético, fatiga y biomarcadores de actividad física en adultos sanos

Siguiendo con la división establecida en la entrega de resultados, este ítem se abordará por orden de estudio planteado (E1, E2 y E3)

13.1 Discusión E1

Este estudio tuvo como objetivo informar, a través de una revisión sistemática de la literatura, los valores de referencia inicial y final obtenidos por espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) durante el entrenamiento de fuerza en adultos sanos. Hasta donde sabemos, esta es la primera revisión sistemática que explora y resume los valores iniciales y finales obtenidos por NIRS durante los ejercicios de fuerza muscular en esta población. Como resultado principal, la SmO_2 se presenta como el biomarcador de oximetría muscular más estudiado con dispositivos NIRS, mostrando que esta variable disminuye como respuesta aguda al ejercicio de fuerza muscular, encontrándose resultados antes del protocolo de fuerza entre (rango = 68.07-77.9%), y posterior (rango = 9.50- 46.09%).

En cuanto a la diversidad de dispositivos utilizados en los estudios seleccionados, el dispositivo Moxy se utilizó en tres de los artículos revisados (Davis et al., 2020; Gómez-Carmona et al., 2020; Timón et al., 2018) y uno de ellos utilizó Portamon (Alvares et al., 2020). Una de las principales características de los dispositivos Moxy y Portamon es que se pueden afirmar manualmente a la superficie del grupo muscular mediante cintas de velcro, lo que hace más funcional su uso en ejercicios como el ciclismo, la carrera y, últimamente, el entrenamiento de la fuerza muscular (Farzam et al., 2018), a diferencia de otros dispositivos como el sensor Wearable Lactate Threshold (WLT) (edición

multideportiva BSXinsight, Austin, TX, EE. UU.) el cual, desde el punto de vista funcional, debe utilizarse en el músculo gastrocnemio dentro de una manga de compresión hecha a medida, lo que podría limitar su uso (Driller et al., 2016).

En la literatura se ha destacado la respuesta muscular de SmO_2 utilizando NIRS durante otros protocolos de ejercicio físico, observándose una correlación significativa con el máximo lactato en estado estacionario, la potencia crítica (Belardinelli et al., 1995) y el segundo umbral ventilatorio (Rodrigo-Carranza et al., 2021), donde se ha indicado que el uso de estos dispositivos contribuye a optimizar y gestionar la respuesta física del deportista en los ejercicios de fuerza (Marta I.R. Pereira et al., 2007; Sáez Sáez De Villarreal et al., 2010). Sin embargo, a pesar de la falta de investigación en el área del entrenamiento de fuerza y SmO_2 , la recopilación de la información presentada en este trabajo puede contribuir a posicionar los dispositivos NIRS como un instrumento a ser utilizado durante el entrenamiento de la fuerza muscular como una alternativa útil, siendo funcional y de bajo costo durante la evaluación y planificación de los protocolos de fuerza muscular, optimizando la prescripción y manejo del rendimiento físico en adultos sanos.

Otro aspecto relevante a discutir es que en todos los artículos seleccionados se evaluó SmO_2 en el VL del cuádriceps, coincidencia que parece interesante analizar a la hora de seleccionar un protocolo de evaluación de SmO_2 ya que la elección del músculos y el protocolo aplicado para evaluar esta variable mediante un NIRS podría influir en los cambios en la oxigenación muscular y afectar lo expresado por los dispositivos, especialmente cuando se evalúan músculos grandes con características heterogéneas en su superficie; por ejemplo, se ha encontrado en la literatura que existen diferencias para VL versus recto femoral del cuádriceps (Koga et al., 2015) o gastrocnemio proximal versus distal (Miura et al., 2001), por lo tanto, se debe tener especial cuidado con el uso de un sólo sitio para predecir las respuestas de todo el músculo o la extremidad. En este mismo aspecto, una revisión realizada por Perrey et al. (Perrey & Ferrari, 2018b) tuvo como objetivo destacar la aplicación de la oximetría muscular en la evaluación del rendimiento del músculo esquelético; de los 57 estudios seleccionados

por los investigadores, 39 evaluaron la SmO_2 en el VL predominantemente en deportes aeróbicos y sólo 2 de ellos analizaron esta variable en este mismo músculo durante el entrenamiento de fuerza muscular, pareciendo ser el músculo preferido en los protocolos de evaluación NIRS, seguido del flexor profundo de los dedos, flexor carpo y gastrocnemio. En este sentido, Wang et al. estudiaron las diferencias entre el VL y el gastrocnemio lateral en la capacidad de evaluar los puntos de corte de la oxigenación muscular (Wang et al., 2012); la diferencia entre estos dos músculos puede deberse a aspectos anatómicos e histoquímicos donde el VL tiene menos fibras de tipo I y menos actividad de citrato sintasa (enzima oxidativa) que el gastrocnemio lateral; debido a esto, las fibras de contracción rápida se reclutarían antes que las del VL cuando la carga de trabajo aumenta de forma continua e incremental, lo que lleva a un aumento del metabolismo anaeróbico en este músculo durante el ejercicio moderado y de alta intensidad (Wang et al., 2012). Otra diferencia entre el VL y el gastrocnemio lateral podrían ser los diferentes patrones de uso de los músculos durante el ciclismo (ejercicio más frecuente evaluado en las investigaciones), donde los músculos monoarticulares (VL participan principalmente en la generación de fuerza; mientras que los músculos biarticulares (gastrocnemio lateral) son los responsables de la transmisión de la fuerza, siendo el VL más activo que el gastrocnemio lateral en este deporte y puede ser el motivo de su preferencia (Hug et al., 2006). Sin embargo, estos problemas aún no se han resuelto por completo.

Es importante reconocer que la interpretación de los resultados que brindan los diferentes dispositivos NIRS disponibles en el mercado puede verse complicada por la diversidad de esta instrumentación en cuanto a terminología asociada (unidades de medida y variables), la falta generalizada de protocolos estandarizados y variedad de muestra. En este sentido, podemos decir que las características de las muestras de los estudios seleccionados para esta revisión son sujetos adultos jóvenes, físicamente activos, sin comorbilidades asociadas y declaración de raza; en la literatura se han argumentado factores que pueden afectar el resultado de las señales de un NIRS, dentro de ellas, la piel con pigmentación oscura (aumento de la concentración de melanina), (Wassenaar & Van den Brand, 2005); también se ha demostrado que el grosor del tejido

adiposo en el músculo esquelético interfiere con los resultados obtenidos por NIRS al reducir la contribución relativa del músculo esquelético subyacente a la respuesta general NIRS, lo que puede resultar en una mayor intensidad de la señal de NIRS debido a la absorción reducida por cromóforos musculares (M. Van Beekvelt et al., 2001). Una vez más, parece ser un tema en desarrollo y un desafío futuro para los próximos dispositivos NIRS que lleguen al mercado.

Finalmente, otro aspecto relevante de los datos recogidos se refiere a la disminución de la SmO_2 durante el entrenamiento de fuerza muscular, esto es, antes del protocolo de fuerza de cada estudio se encontraron rangos = 68.07 - 77.9% y después del ejercicio rango = 9.50 - 46.09%, resultados que responden a la intensidad del protocolo de fuerza muscular aplicado, los cuales no superan el 75% de la RM, reconociéndose como una intensidad de carga moderada. Como se informa en la literatura, este resultado puede ser la causa de un mayor VO_2 por parte del músculo esquelético durante el esfuerzo solicitado en cada estudio; lo anterior puede tener relación con la demanda de O_2 muscular en ejercicio donde se ha descrito que incluso podría aumentar hasta 50 veces durante el entrenamiento de alta intensidad (Hamaoka et al., 2011). El ejercicio de alta intensidad se caracteriza por perfiles metabólicos diferentes a los del ejercicio realizado a ritmos de trabajo más bajos; durante el ejercicio intenso, la disminución del pH intramuscular y la concentración de fosfocreatina, el aumento de las concentraciones de lactato sanguíneo, de fosfato inorgánico intramuscular y el aumento del VO_2 continúan hasta la fatiga muscular, lo que refleja un sistema metabólico muscular ineficaz en el tiempo (Hammer et al., 2020). Más específicamente, se ha demostrado que durante el ejercicio de fuerza muscular, el aumento de la presión mecánica intramuscular puede conducir a una reducción del flujo sanguíneo, lo que podría resultar en una hipoxia muscular transitoria (Hug et al., 2006), llevando al sujeto a sensaciones de fatiga y disminución del rendimiento físico.

13.2 Discusión E2

El objetivo de este estudio fue establecer la confiabilidad del NIRS Humon Hex para determinar la SmO_2 y la Hgb en reposo y durante ejercicios de fuerza isométrica y dinámica utilizando un dinamómetro electromecánico funcional. Los principales hallazgos de este estudio sugieren que este NIRS es confiable en condiciones de reposo e isometría, ya que muestra una repetitividad estable ($CV < 5,76\%$), que se vuelve menos precisa al aumentar la intensidad y la fuerza muscular (dinámica).

Estudios previos que se evaluaron la SmO_2 utilizando otros NIRS posicionados en el VL durante un ejercicio dinámico de máxima extensión de rodilla obtuvieron resultados muy similares a los obtenidos en este estudio, en las muestras analizadas por los estudios mencionados se obtuvo que el ejercicio de extensión de rodilla provocó un ligero aumento en la SmO_2 y luego una tendencia decreciente (Azuma et al., 2000; Feldmann et al., 2019; Okushima et al., 2020; Tew et al., 2010) Así mismo, otras investigaciones que evaluaron la SmO_2 y respuestas de Hgb en otros protocolos de fuerza dinámica utilizando otros NIRS explicaron que, a medida que aumenta la intensidad del esfuerzo la SmO_2 tiende a disminuir en el tiempo (Gómez-Carmona et al., 2020; McManus et al., 2018; Okushima et al., 2020). Algo semejante ocurre con otros autores que reportan el comportamiento de SmO_2 y Hgb utilizando Humon Hex; en este tema es importante destacar que sólo hemos encontrado una publicación que utiliza el dispositivo durante un ejercicio de fuerza resistencia de tipo incremental hasta el fallo muscular utilizando un ergómetro estacionario con resultados de comportamiento de disminución posterior al ejercicio similares a los obtenidos en este estudio (Farzam et al., 2018).

En este estudio, además de evaluar la confiabilidad del dispositivo, también se puso atención a los cambios en la oximetría muscular durante la realización de los ejercicios. Más específicamente, respecto de cada ejercicio de fuerza muscular considerado en este estudio, en la respuesta de SmO_2 al protocolo de isometría, de la limitada literatura encontrada en el tema, en una primera instancia nuestros resultados se observan

diferentes a los obtenidos en otros estudios que midieron la SmO_2 con NIRS colocado en el VL durante el ejercicio de máxima extensión isométrica de rodilla, en ellos se puede evidenciar una disminución inmediata en SmO_2 al inicio de la contracción isométrica, al contrario de lo obtenido en este estudio que corresponde a una reacción inicial hacia el incremento de esta variable (McManus et al., 2018; Moalla et al., 2012; Marta Inez R. Pereira et al., 2009) A modo de discusión, cabe señalar que los protocolos de isometría revisados en la literatura consistieron en un total de 20 a 30 s hasta el agotamiento, diferenciándose de los 8 s utilizados en el este estudio, que podrían resultar insuficientes para el esfuerzo del sujeto. A pesar de esto, nuestros resultados son consistentes con los de un individuo analizado en el estudio de Pereira et al., donde SmO_2 aumentó durante los primeros segundos del ejercicio y luego también disminuyó en el tiempo (Marta Inez R. Pereira et al., 2009).

Desde un punto de vista fisiológico, la respuesta del músculo esquelético al esfuerzo logrado en este estudio se puede justificar porque el VO_2 a nivel muscular excedió su aporte, lo que teóricamente aumenta los niveles de lactato en sangre y es la respuesta a una aceleración de la glucólisis sobre el suministro de energía oxidativa (Farzam et al., 2018). Por otra parte, cuando la captación de O_2 por los músculos aumenta repentinamente en proporción a los aumentos en el reclutamiento de unidades motoras y la activación de las fibras musculares, una forma rápida de aumentar el suministro de O_2 es que la mioglobina que se encuentran saturadas de O_2 en el músculo ceda sus O_2 . En general, en un músculo en reposo, la extracción de O_2 está entre el 20% y el 40% (M. C. P. Van Beekvelt et al., 2001), que aumenta al 70% -80% en niveles crecientes de ejercicio (Proctor et al., 1998), lo que podría explicar la disminución de SmO_2 durante el esfuerzo físico.

En lo que respecta a nuestra revisión, este es el primer estudio que buscó evaluar la fiabilidad de Humon Hex durante ejercicios de fuerza muscular dinámicos e isométricos. La literatura ha establecido la confiabilidad de otros NIRS durante los ejercicios de fuerza muscular (Baláš et al., 2018) y bajo otras circunstancias experimentales de ejercicio físico, donde los resultados de fiabilidad han sido similares

a los obtenidos en este estudio, tal es el caso del ciclismo en protocolos incrementales (CCI = 0,77-0,99) (Crum et al., 2017), ejercicio de ciclismo de alta intensidad (CCI = 0,67) (Koga et al., 2015), cambios inducidos por provocación ortostática en el volumen sanguíneo de las extremidades inferiores (CCI = 0,75) (Stone et al., 2016) y método de oclusión arterial, pruebas pasivas y prueba activa (Feldmann et al., 2019).

13.3 Discusión E3

El objetivo del estudio fue describir y comparar la respuesta aguda de la oximetría muscular (SmO_2) y la concentración de hemoglobina (Hgb) en el VL durante los protocolos de ejercicio de fuerza hasta el fallo muscular. Los principales hallazgos sugieren que (i) se observaron niveles mínimos de SmO_2 ($66,31 \pm 9,38\%$) y Hgb ($12,22 \pm 0,55$ g/dL) durante P2, (ii) no se encontraron diferencias significativas entre las cargas medias de los respectivos protocolos para SmO_2 y (iii) la Hgb muscular difirió significativamente entre el reposo y P1 y el reposo y P3. Estos hallazgos podrían discriminar la dinámica de la saturación de O_2 muscular en el VL durante diferentes protocolos e intensidades en los ejercicios de fuerza muscular.

Los resultados de este estudio indican que la condición de reposo muestra valores medios de SmO_2 de $66,72 \pm 12,06\%$, lo que concuerda con los datos basales de otros estudios (Miranda-Fuentes et al., 2021). Por otro lado, ni P1, P2 y P3 parecieron modificar significativamente la SmO_2 respecto de reposo, lo cual se condice con otros resultados expuestos en la literatura donde, en un protocolo de fuerza isométrica de 3 segundos y otro de fatiga isocinética de extensores de rodilla realizando 15 repeticiones a máxima intensidad a una velocidad de 60° por segundo, no encontraron diferencias significativas de SmO_2 pre y post protocolo de fuerza entre la pierna experimental (sometida a funcional dry needling) y la pierna control (Mead et al., 2021).

A pesar de lo anterior, en P1 y P3 la SmO_2 mostró una tendencia al aumento con respecto al reposo, situación que parece interesante de discutir dada la discrepancia respecto de los resultados de esta variable posteriores a un ejercicio de fuerza muscular

(Miranda-Fuentes et al., 2021). A modo de análisis, existen razones que pueden justificar esta diferencia, consideramos que la carga de trabajo empleada puede influir en la respuesta de oximetría; diversos estudios consideraron cargas sub máximas y tiempos bajo tensión más prolongados que el propuesto en este estudio, siendo el caso de Gomez-Carmona et al. quienes utilizaron cargas que variaron entre el 60% 1RM (~20RM) y 75% 1RM (~10RM) (Gómez-Carmona et al., 2020); Davis et al. aplicó un protocolo de 3 series de 15 repeticiones al 70% 1RM para sentadillas frontales y traseras (Davis et al., 2020); Timon et al., utilizó en su estudio 3 x 8 repeticiones 75-80% 1RM (Timón et al., 2018) y Alvares et. al., ejecutaron series de 6 contracciones voluntarias máximas a velocidad rápida ($180^{\circ} \text{ s}^{-1}$) durante la fase de extensión de rodilla (Alvares et al., 2020), en comparación con el protocolo de la presente investigación el cual consideró 8 s para P1 y 20-30 s aproximadamente para P2-P3, realizando 3 series con incrementos intrarrepetición de 2 kilos hasta el fallo muscular. En este caso de acuerdo a la intensidad del ejercicio aplicado, la carga creciente de este y los sustratos energéticos demandados no alcanzaron a requerir mayor presencia de O_2 para su metabolismo, razón por la cual asumimos que fue la causa del no descenso de la SmO_2 (Strasser et al., 2012); por otra parte, el aumento en la oxigenación muscular puede ser explicado desde un punto de vista fisiológico donde se espera que el tejido muscular tenga una respuesta anticipatoria y preparatoria en los segundos iniciales del ejercicio, recibiendo un incremento en su irrigación gracias a una redistribución de flujos desde territorios inactivos a activos, lo que contribuye a mantener y mejorar las reservas de O_2 a nivel muscular para los procesos energéticos que requerirán aporte de este elemento durante la ejecución del ejercicio (Hearon & Dinunno, 2016); esta respuesta también fue descrita en un estudio previo que analizó el comportamiento de un sujeto durante la ejecución de tres protocolos de fuerza muscular (Miranda-Fuentes et al., 2020).

En contraparte, en P2 la tendencia del comportamiento de la SmO_2 es a mantenerse o disminuir levemente respecto de reposo. Primeramente, el cuestionamiento de estos resultados parece indicar que la prescripción inicial de la carga de trabajo influye en la respuesta metabólica del tejido, demostrando ser más demandante una carga

desde un valor isométrico promedio (P2) que un valor isométrico peak (P3). En este sentido, un aumento de la demanda metabólica en el tejido se produjo con el fin de generar mayor energía en corto tiempo y prevenir las limitaciones físicas producidas por la fatiga muscular impuesta por la carga (Kirby et al., 2021); en la literatura se ha demostrado que el incremento en las tasas de trabajo al realizar ejercicios de fuerza muscular aumenta las demandas de O_2 en el músculo esquelético, las cuales pueden exceder la capacidad de los sistemas para suministrarlo, sobre todo en ejercicios de alta intensidad (D. C. Poole & Richardson, 1997) donde se ha establecido que la potencia crítica está asociada con el suministro de O_2 en los tejidos (Kellawan et al., 2014) y en ejercicios de fuerza muscular el aumento de la presión mecánica intramuscular puede conducir a una reducción del flujo sanguíneo (Hammer et al., 2020), lo que podría resultar en una hipoxia muscular transitoria (Hug et al., 2006), llevando al sujeto a sensaciones de fatiga y disminución del rendimiento físico, pudiendo ser explicado en este trabajo, por la tendencia a la disminución de la SmO_2 .

En un estudio realizado por Belardinelli et al. quienes estudiaron a 11 sujetos en un ejercicio de trabajo incremental se demostró que en la medida que se intensificó la tasa de trabajo, la oxigenación tisular tendió a disminuir (Belardinelli et al., 1995); por otra parte, también se ha asociado la disminución en la oxigenación muscular al punto en el cual la tasa de trabajo y la tasa metabólica producen incrementos en la producción de lactato en sangre por un exceso de dióxido de carbono (CO_2), es decir, donde la extracción adicional de O_2 se logra principalmente mediante la reducción de la saturación de hemoglobina a un mínimo constante de presión parcial de oxígeno (PO_2) por el desplazamiento hacia la derecha de la curva de disociación de oxihemoglobina inducido por la acidosis provocada por el incremento del lactato (Stringer et al., 1994). Otro de los resultados entregados en este estudio son los referentes a Hgb muscular, donde esta variable difirió significativamente entre P1 y P3 respecto a la condición reposo. En los tejidos, una PPO_2 de 26 mm de Hg hace que la mioglobina se sature en más del 98%; la gran afinidad que muestra la mioglobina por el O_2 es importante para su función biológica: captar para la célula el O_2 que aporta la hemoglobina de la sangre (C. Myers, 2020). En nuestro estudio, el comportamiento de Hgb acompaña el de la

SmO₂. A la fecha, existe escasa literatura respecto de la respuesta de esta variable durante ejercicio de fuerza muscular para contrastar nuestros resultados, sin embargo, estos resultados están en línea con los obtenidos por Lucero et al. en el grupo de control de su estudio durante el ejercicio de extensión de rodilla isotónica rítmica de 90 grados de intensidad progresiva (Lucero et al., 2018). Finalmente, tratando de comparar comportamientos y determinando si Hgb es capaces de discriminar la carga de entrenamiento, en el presente estudio encontramos que ejercitarse con fuerza isométrica máxima y con fuerza dinámica comenzando con una carga del 40% de fuerza isométrica pick (P3) indujo un significativo aumento de Hgb en comparación con reposo y P2. En contraste, en este trabajo la SmO₂ no nos permitió discriminar entre protocolos.

Conclusiones

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

14. CONCLUSIONES

A través de tres estudios hemos podido resolver los primeros objetivos específicos planteados para esta investigación doctoral. En respuesta al objetivo general de esta investigación podemos decir que el entrenamiento de fuerza muscular incide en el comportamiento de oximetría muscular expresado a través de SmO_2 (%) pero esta depende del tipo de ejercicio que se ejecute.

En relación con los objetivos específicos se determinan las siguientes conclusiones:

- La oximetría muscular, en la evaluación del rendimiento del músculo esquelético durante los ejercicios de fuerza muscular, es un área emergente.
- La variable más estudiada con los dispositivos NIRS es la SmO_2 y el músculo preferente para evaluación de oximetría durante ejercicios de fuerza muscular es el Vasto Lateral del cuádriceps.
- La tendencia de SmO_2 es a disminuir después de un protocolo de fuerza muscular, pero esta variación depende de la intensidad y duración del ejercicio de fuerza.
- El dispositivo NIRS (Humon Hex) es un instrumento fiable para medir cambios en las características locales del O_2 en la Hb muscular en condiciones de reposo y fuerza isométrica, lo que proporciona precisión para las mediciones realizadas con este dispositivo en estas condiciones; por otro lado, resulta poco fiable en ejercicios más dinámicos.
- Finalmente, ejercicios de intensidad creciente y corta duración no modifican significativamente la SmO_2 (%), sin embargo, la Hgb se ve significativamente incrementada respecto al reposo en protocolos de fuerza isométrica y dinámica, demostrando ser una posible herramienta de discriminación de cargas de trabajo para protocolos de fuerza muscular.
- Faltan estudios que permitan ampliar el uso de los dispositivos NIRS durante el entrenamiento de fuerza muscular.

Limitaciones

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

15. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Una vez ejecutada la presente investigación, a continuación, se plantean las principales limitaciones que se han podido encontrar durante su desarrollo:

- Es importante destacar que, para la temporalidad considerada en un principio para el desarrollo del plan de investigación doctoral presentado y las condiciones sanitarias que nos han afectado por varios meses a nivel mundial con la pandemia de SARS- CoV2, si bien hemos alcanzado grandes resultados de acuerdo a parte de los objetivos propuestos inicialmente los cuales nos permiten presentarnos hoy en día a defender este grado académico, el desarrollo de la totalidad de los objetivos de la tesis doctoral no serán concluidos en el presente informe, sino que serán continuados por futuros doctorandos interesados en abordar esta importante línea de investigación.
- No se pudo cumplir con el cálculo muestral estimado y un muestreo de tipo probabilístico por las justificaciones enunciadas en el punto anterior. Sin embargo, se lograron analizar los objetivos gracias a un muestreo por conveniencia. Por otro lado, la muestra estuvo conformada sólo por hombres sanos, resultando interesante observar el comportamiento de esta variable incluyendo mujeres y otras poblaciones.
- Las respuestas SmO_2 y Hgb sólo se evaluaron en el miembro inferior dominante. Sería interesante evaluar ambos segmentos para contrastar y describir comportamientos metabólicos.
- Se tomó la decisión de monitorear sólo el músculo recto femoral en lugar de otro músculo, ya que otras publicaciones consideraron que era una de las áreas más común para examinar la SmO_2 con NIRS (Farzam et al., 2018; Perrey & Ferrari, 2018a); sin embargo, sería interesante ampliar la descripción a otros segmentos musculares.
- Una evaluación de la concentración de hemoglobina venosa habría ayudado a confirmar condiciones consistentes y se considerará en futuras investigaciones.

- Cabe destacar que este estudio es el primero en utilizar Humon Hex en ejercicios de fuerza dinámica, por lo que no es posible contrastar nuestros resultados con otras publicaciones sobre la valoración de este dispositivo.

Futuras líneas de investigación

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

16. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

La utilización de los instrumentos NIRS para evaluación y seguimiento del entrenamiento de fuerza muscular es un área emergente dentro de las ciencias del ejercicio por lo que las oportunidades de continuidad de investigación son variadas.

Aunque la instrumentación NIRS ha demostrado ser prometedora para evaluar el rendimiento del músculo esquelético cuando se usa en entornos deportivos, todavía existe la necesidad de un mayor desarrollo de la investigación con ensayos aleatorizados/longitudinales con respecto al uso de estos instrumentos durante el entrenamiento de fuerza para respaldar las ventajas ya demostradas de la uso de la oximetría muscular en otros deportes y extrapolarlos a protocolos que incluyan ejercicios de fuerza muscular, potenciando su uso como herramienta complementaria para monitorizar la respuesta a este tipo de entrenamientos con ellos para optimizar el rendimiento del deportista. Lo anterior puede ser ampliado a una muestra más amplia, ambos sexos; comparar comportamiento de oximetría muscular en el ciclo vital; incluir determinar oximetría muscular según segmentos corporales y otras zonas en el mismo músculo.

Finalmente, resulta desafiante poder determinar valores normativos de oximetría muscular en diferentes poblaciones y respuestas según ciclo vida.

Bibliografía

Fuerza y oximetría muscular en adultos sanos.

17. BIBLIOGRAFÍA

- Althobaiti, M., & Al-Naib, I. (2020). Recent Developments in Instrumentation of Functional Near-Infrared Spectroscopy Systems. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 6522, 10(18), 6522. <https://doi.org/10.3390/APP10186522>
- Alvares, T. S., Oliveira, G. V. de, Soares, R., & Murias, J. M. (2020). Near-infrared spectroscopy-derived total haemoglobin as an indicator of changes in muscle blood flow during exercise-induced hyperaemia. *Journal of Sports Sciences*, 38(7), 751–758. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1733774>
- American College of Sports. (2009). Stec, Michael J. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(3), 687–708. <https://doi.org/10.1249/MSS.0B013E3181915670>
- Arnold, C. M., Warkentin, K. D., Chilibeck, P. D., & Magnus, C. R. A. (2010). The reliability and validity of handheld dynamometry for the measurement of lower-extremity muscle strength in older adults. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(3), 815–824. <https://doi.org/10.1519/JSC.0B013E3181AA36B8>
- Ashton, R., Tew, G., Aning, J., Gilbert, S., Lewis, L., & Axton, J. (2020). Effects of short-term, medium-term and long-term resistance exercise training on cardiometabolic health outcomes in adults: systematic review with meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 54(6), 341–348. <https://doi.org/10.1136/BJSPORTS-2017-098970>
- Azuma, K., Homma, S., & Kagaya, A. (2000). Oxygen supply-consumption balance in the thigh muscles during exhausting knee-extension exercise. *Journal of Biomedical Optics*, 5(1), 97. <https://doi.org/10.1117/1.429974>
- Baena-Raya, A., Díez-Fernández, D. M., García-Ramos, A., Soriano-Maldonado, A., & Rodríguez-Pérez, M. A. (2021). Concurrent validity and reliability of a functional electromechanical dynamometer to assess isometric mid-thigh pull performance: *Journal of Sports Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1177/17543371211030180>
- Baláš, J., Kodejška, J., Krupková, D., Hannsmann, J., & Fryer, S. (2018). Reliability of near-infrared spectroscopy for measuring intermittent handgrip contractions in sport climbers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(2), 494–501.

<https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000002341>

Barstow, T. J. (2019). Understanding near infrared spectroscopy and its application to skeletal muscle research. *Journal of Applied Physiology*, 126(5), 1360–1376.

<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00166.2018>

Bastida Castillo, A., Gómez Carmona, C., & Pino Ortega, J. (2016). Efectos del Tipo de Recuperación Sobre la Oxigenación Muscular Durante el Ejercicio de Sentadilla. *Kronos: A Journal of Interdisciplinary Synthesis*, 15(2), 7.

Bazyler, C. D., Beckham, G. K., & Sato, K. (2015). The use of the isometric squat as a measure of strength and explosiveness. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(5), 1386–1392. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000751>

Beaudart, C., Reginster, J. Y., Petermans, J., Gillain, S., Quabron, A., Locquet, M., Slomian, J., Buckinx, F., & Bruyère, O. (2015). Quality of life and physical components linked to sarcopenia: The SarcoPhAge study. *Experimental Gerontology*, 69, 103–110. <https://doi.org/10.1016/J.EXGER.2015.05.003>

Belardinelli, R., Barstow, T., Porszasz, J., & Wasserman, K. (1995). Changes in skeletal muscle oxygenation during incremental exercise measured with near infrared spectroscopy. / Modifications de l'oxygénation du muscle squelettique lors d'un exercice progressif, mesurées par spectroscopie infrarouge. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 70(6), 487–492. <http://articles.sirc.ca/search.cfm?id=380710%5Cnhttp://ezproxy.library.yorku.ca/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=sph&AN=SPH380710&site=ehost-live%5Cnhttp://link.springer.de>

Bendahan, D., Chatel, B., & Jue, T. (2017). Comparative NMR and NIRS analysis of oxygen-dependent metabolism in exercising finger flexor muscles. *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, 313(6), R740–R753. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00203.2017>

Bigland-Ritchie, B., & Woods, J. J. (1976). Integrated electromyogram and oxygen uptake during positive and negative work. *The Journal of Physiology*, 260(2), 267. <https://doi.org/10.1113/JPHYSIOL.1976.SP011515>

Blazevich, A., Cannavan, D., Coleman, D. R., & Horne, S. (2007). Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps

- muscles. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 103(5), 1565–1575. <https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.00578.2007>
- Bonetti, L. V., Hassan, S. A., Lau, S. T., Melo, L. T., Tanaka, T., Patterson, K. K., & Reid, W. D. (2019). Oxyhemoglobin changes in the prefrontal cortex in response to cognitive tasks: a systematic review. In *International Journal of Neuroscience* (Vol. 129, Issue 2, pp. 195–203). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/00207454.2018.1518906>
- Bopp, C. M., Townsend, D. K., Warren, S., & Barstow, T. J. (2014). Relationship between brachial artery blood flow and total [hemoglobin+myoglobin] during post-occlusive reactive hyperemia. *Microvascular Research*, 91, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.mvr.2013.10.004>
- Bouchard, C., Shephard, R. J., & Brubaker, P. H. (1994). Physical activity; fitness and health: International proceedings and consensus statement. *Champaign III: Human Kinetics*, 26(1), 119.
- Cahu Rodrigues, S., Farah, B., Silva, G., Correia, M., Pedrosa, R., Vianna, L., & Ritti-Dias, R. (2020). Vascular effects of isometric handgrip training in hypertensives. *Clinical and Experimental Hypertension (New York, N.Y.: 1993)*, 42(1), 24–30. <https://doi.org/10.1080/10641963.2018.1557683>
- Calbet, J. A. L., Losa-Reyna, J., Torres-Peralta, R., Rasmussen, P., Ponce-González, J. G., Sheel, A. W., Calle-Herrero, J. de la, Guadalupe-Grau, A., Morales-Alamo, D., Fuentes, T., Rodríguez-García, L., Siebenmann, C., Boushel, R., & Lundby, C. (2015). Limitations to oxygen transport and utilization during sprint exercise in humans: evidence for a functional reserve in muscle O₂ diffusing capacity. *The Journal of Physiology*, 593(20), 4649–4664. <https://doi.org/10.1113/JP270408>
- Caspersen, C. J., Powell, K. E., & Christenson, G. M. (1985). Physical activity, exercise, and physical fitness: definitions and distinctions for health-related research. *Public Health Reports*, 100(2), 126. [/pmc/articles/PMC1424733/?report=abstract](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1424733/)
- Chaabene, H., Lesinski, M., Behm, D. G., & Granacher, U. (2020). Performance-and health-related benefits of youth resistance training. In *Sports Orthopaedics and Traumatology*. Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.orthtr.2020.05.001>
- Chamorro, C., De La Fuente, C., Jerez, D., Campos, C., & Chiroso, L. J. (2018). Reliability of

- shoulder rotators isometric strength test using a novel pulley electromechanical dynamometer. Influence of the assessment position. *Asian Journal of Sports Medicine*, 9(2). <https://doi.org/10.5812/asjasm.60406>
- Chamorro, C., de la Fuente, C., Rubio, J., Campos, C., & Chiroso, L. J. (2019). Absolute reliability and concurrent validity of a novel electromechanical pulley dynamometer for measuring shoulder rotation isometric strength in asymptomatic subjects. Study conducted at Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile. *Journal of the Pakistan Medical Association*, 69(7), 1000–1005. <https://europepmc.org/article/med/31308571>
- Chen, T., Tseng, W., Huang, G., Chen, H., Tseng, K., & Nosaka, K. (2017). Superior Effects of Eccentric to Concentric Knee Extensor Resistance Training on Physical Fitness, Insulin Sensitivity and Lipid Profiles of Elderly Men. *Frontiers in Physiology*, 8(APR). <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2017.00209>
- Chodzko-Zajko, W., Proctor, D., Fiatarone Singh, M., Minson, C., Nigg, C., Salem, G., & Skinner, J. (2009). American College of Sports Medicine position stand. Exercise and physical activity for older adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(7), 1510–1530. <https://doi.org/10.1249/MSS.0B013E3181A0C95C>
- Ciolac, E., & Rodrigues-da-Silva, J. (2016). Resistance Training as a Tool for Preventing and Treating Musculoskeletal Disorders. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 46(9), 1239–1248. <https://doi.org/10.1007/S40279-016-0507-Z>
- Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Earlbaum Associates. In *Lawrence Earlbaum Associates*.
- Collins, H., Booth, J. N., Duncan, A., Fawcner, S., & Niven, A. (2019). The Effect of Resistance Training Interventions on ‘The Self’ in Youth: a Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine - Open* 2019 5:1, 5(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/S40798-019-0205-0>
- Cornelissen, V., & Smart, N. (2013). Exercise training for blood pressure: a systematic review and meta-analysis. *Journal of the American Heart Association*, 2(1). <https://doi.org/10.1161/JAHA.112.004473>
- Cortell-Tormo, J., Sánchez, P., Chulvi-Medrano, I., Tortosa-Martínez, J., Manchado-López, C., Llana-Belloch, S., & Pérez-Soriano, P. (2018). Effects of functional resistance

- training on fitness and quality of life in females with chronic nonspecific low-back pain. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, 31(1), 95–105. <https://doi.org/10.3233/BMR-169684>
- Counts, B. R., Buckner, S. L., Mouser, J. G., Dankel, S. J., Jessee, M. B., Mattocks, K. T., & Loenneke, J. P. (2017). Muscle growth: To infinity and beyond? *Muscle & Nerve*, 56(6), 1022–1030. <https://doi.org/10.1002/MUS.25696>
- Crum, E. M., O'Connor, W. J., Van Loo, L., Valckx, M., & Stannard, S. R. (2017). Validity and reliability of the Moxy oxygen monitor during incremental cycling exercise. *European Journal of Sport Science*, 17(8), 1037–1043. <https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1330899>
- D'Aurea, C., Poyares, D., Passos, G., Santana, M. G., Youngstedt, S. D., Souza, A. A., Bicudo, J., Tufik, S., & De Mello, M. T. (2019). Effects of resistance exercise training and stretching on chronic insomnia. *Revista Brasileira de Psiquiatria (Sao Paulo, Brazil : 1999)*, 41(1), 51–57. <https://doi.org/10.1590/1516-4446-2018-0030>
- Damas, F., Libardi, C. A., & Ugrinowitsch, C. (2018). The development of skeletal muscle hypertrophy through resistance training: the role of muscle damage and muscle protein synthesis. *European Journal of Applied Physiology*, 118(3), 485–500. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3792-9>
- Damas, F., Phillips, S. M., Libardi, C. A., Vechin, F. C., Lixandrão, M. E., Jannig, P. R., Costa, L. A. R., Bacurau, A. V., Snijders, T., Parise, G., Tricoli, V., Roschel, H., & Ugrinowitsch, C. (2016). Resistance training-induced changes in integrated myofibrillar protein synthesis are related to hypertrophy only after attenuation of muscle damage. *The Journal of Physiology*, 594(18), 5209–5222. [https://doi.org/10.1113/JP272472@10.1111/\(ISSN\)1469-7793.TOPCITEDPAPERS2015-2017](https://doi.org/10.1113/JP272472@10.1111/(ISSN)1469-7793.TOPCITEDPAPERS2015-2017)
- Damas, F., Phillips, S. M., Lixandrão, M. E., Vechin, F. C., Libardi, C. A., Roschel, H., Tricoli, V., & Ugrinowitsch, C. (2016). Early resistance training-induced increases in muscle cross-sectional area are concomitant with edema-induced muscle swelling. *European Journal of Applied Physiology*, 116(1), 49–56. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3243-4>
- Damas, F., Phillips, S., Vechin, F. C., & Ugrinowitsch, C. (2015). A Review of Resistance

- Training-Induced Changes in Skeletal Muscle Protein Synthesis and Their Contribution to Hypertrophy. *Sports Medicine* 2015 45:6, 45(6), 801–807. <https://doi.org/10.1007/S40279-015-0320-0>
- Davis, P. R., Yakel, J. P., & Anderson, D. J. F. (2020). Muscle Oxygen Demands of the Vastus Lateralis in Back and Front Squats. *International Journal of Exercise Science*, 13(6), 734–743. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32509135>
- DeLorey, D., Paterson, D., & Kowalchuk, J. (2007). Effects of ageing on muscle O₂ utilization and muscle oxygenation during the transition to moderate-intensity exercise. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition et Metabolisme*, 32(6), 1251–1262. <https://doi.org/10.1139/H07-121>
- Dieli-Conwright, C. M., Courneya, K. S., Demark-Wahnefried, W., Sami, N., Lee, K., Buchanan, T. A., Spicer, D. V., Tripathy, D., Bernstein, L., & Mortimer, J. E. (2018). Effects of Aerobic and Resistance Exercise on Metabolic Syndrome, Sarcopenic Obesity, and Circulating Biomarkers in Overweight or Obese Survivors of Breast Cancer: A Randomized Controlled Trial. *Journal of Clinical Oncology: Official Journal of the American Society of Clinical Oncology*, 36(9), 875–883. <https://doi.org/10.1200/JCO.2017.75.7526>
- Dos Santos, W. D. N., Gentil, P., Lima de Araujo Ribeiro, A., Vieira, C. A., & Martins, W. R. (2018). Effects of variable resistance training on maximal strength: A meta-analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(11), e52–e55. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000002836>
- Douglas, J., Pearson, S., Ross, A., & McGuigan, M. (2017). Eccentric Exercise: Physiological Characteristics and Acute Responses. *Sports Medicine*, 47(4), 663–675. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0624-8>
- Driller, M., Plews, D., & Borges, N. (2016). Wearable near infrared sensor for determining an athlete's lactate threshold during exercise. *NIR News*, 27(4), 8–10. <https://doi.org/10.1255/nirn.1609>
- Dumont, N. A., Bentzinger, C. F., Sincennes, M. C., & Rudnicki, M. A. (2015). Satellite cells and skeletal muscle regeneration. *Comprehensive Physiology*, 5(3), 1027–1059. <https://doi.org/10.1002/cphy.c140068>
- Dvir, Z., & Müller, S. (2020). Multiple-Joint Isokinetic Dynamometry: A Critical Review.

- Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(2), 587–601.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002982>
- El-Kotob, R., Ponzano, M., Chaput, J., Janssen, I., Kho, M., Poitras, V., Ross, R., Ross-White, A., Saunders, T., & Giangregorio, L. (2020). Resistance training and health in adults: an overview of systematic reviews. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition et Metabolisme*, 45(10 (Suppl. 2)), S165–S179.
<https://doi.org/10.1139/APNM-2020-0245>
- English, K., Loehr, J., Lee, S., & Smith, S. (2014). Early-phase musculoskeletal adaptations to different levels of eccentric resistance after 8 weeks of lower body training. *European Journal of Applied Physiology*, 114(11), 2263–2280.
<https://doi.org/10.1007/S00421-014-2951-5>
- Enoka, R. M. (1988). Muscle Strength and Its Development. *Sports Medicine* 1988 6:3, 6(3), 146–168. <https://doi.org/10.2165/00007256-198806030-00003>
- Farzam, P., Starkweather, Z., & Franceschini, M. A. (2018). Validation of a novel wearable, wireless technology to estimate oxygen levels and lactate threshold power in the exercising muscle. *Physiological Reports*, 6(7), e13664.
<https://doi.org/10.14814/phy2.13664>
- Feldmann, A., Schmitz, R., & Erlacher, D. (2019). Near-infrared spectroscopy-derived muscle oxygen saturation on a 0% to 100% scale: reliability and validity of the Moxy Monitor. *Journal of Biomedical Optics*, 24(11), 1.
<https://doi.org/10.1117/1.jbo.24.11.115001>
- Fernández-Tresguerres, Jesús A. Cachofeiro, V., Cardinali, D. P., Delpón, E., Díaz-Rubio, E. R., Eduardo Escrich, E., Vicente Lahera, J., Francisco Mora, T., & Romano Pardo, M. (2020). Características de la circulación en diferentes órganos y sistemas. In *Fisiología humana 5e* (McGraw Hill).
- Ferrari, M., Muthalib, M., & Quaresima, V. (2011). The use of near-infrared spectroscopy in understanding skeletal muscle physiology: recent developments. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 369(1955), 4577–4590. <https://doi.org/10.1098/RSTA.2011.0230>
- Ferreira, L., Townsend, D., Lutjemeier, B., & Barstow, T. (2005). Muscle capillary blood flow kinetics estimated from pulmonary O₂ uptake and near-infrared

- spectroscopy. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 98(5), 1820–1828. <https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.00907.2004>
- Ford, P., De Ste Croix, M., Lloyd, R., Meyers, R., Moosavi, M., Oliver, J., Till, K., & Williams, C. (2011). The long-term athlete development model: physiological evidence and application. *Journal of Sports Sciences*, 29(4), 389–402. <https://doi.org/10.1080/02640414.2010.536849>
- Formenti, D., Perpetuini, D., Iodice, P., Cardone, D., Michielon, G., Scurati, R., Alberti, G., & Merla, A. (2018). Effects of knee extension with different speeds of movement on muscle and cerebral oxygenation. *PeerJ*, 2018(10). <https://doi.org/10.7717/peerj.5704>
- Frontera, W. R., & Ochala, J. (2015). Skeletal Muscle: A Brief Review of Structure and Function. In *Behavior Genetics* (Vol. 45, Issue 2, pp. 183–195). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s00223-014-9915-y>
- Fukuoka, Y., Poole, D., Barstow, T., Kondo, N., Nishiwaki, M., Okushima, D., & Koga, S. (2015). Reduction of $\dot{V}O_2$ slow component by priming exercise: novel mechanistic insights from time-resolved near-infrared spectroscopy. *Physiological Reports*, 3(6). <https://doi.org/10.14814/PHY2.12432>
- Fulton, S. K., Pyne, D., Hopkins, W., & Burkett, B. (2009). Variability and progression in competitive performance of Paralympic swimmers. *Journal of Sports Sciences*, 27(5), 535–539. <https://doi.org/10.1080/02640410802641418>
- Gaëlle, C., Aline, S., Cyril, D., Caroline, T., François, P., & Sébastien, W.-E. (2006). Sarcopenia is predictive of nosocomial infection in care of the elderly. *The British Journal of Nutrition*, 96(5), 895–901. <https://doi.org/10.1017/BJN20061943>
- Gambassi, B. B., Coelho, H. J., Schwingel, P. A., Almeida, F. D. J. F., Novais, T. M. G., Oliveira, P. D. L. L., Sauaia, B. A., Melo, C. D., Uchida, M. C., & Rodrigues, B. (2017). Resistance training and stroke: A critical analysis of different training programs. *Stroke Research and Treatment*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4830265>
- García-Hermoso, A., Caverro-Redondo, I., Ramírez-Vélez, R., Ruiz, J. R., Ortega, F. B., Lee, D. C., & Martínez-Vizcaíno, V. (2018). Muscular Strength as a Predictor of All-Cause Mortality in an Apparently Healthy Population: A Systematic Review and Meta-Analysis of Data From Approximately 2 Million Men and Women. In *Archives of*

- Physical Medicine and Rehabilitation* (Vol. 99, Issue 10, pp. 2100-2113.e5). W.B. Saunders. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2018.01.008>
- Gault, M., & Willems, M. (2013). Aging, functional capacity and eccentric exercise training. *Aging and Disease*, 4(6), 351–363. <https://doi.org/10.14336/AD.2013.0400351>
- Gómez-Carmona, C. D., Bastida-Castillo, A., & Pino-Ortega, J. (2019). Vista de Uso de la espectroscopia de infrarrojo cercano para la medición de la saturación de oxígeno muscular en el deporte. *Rev Andal Med Deporte*, 12(11), 41–46. <https://ws072.juntadeandalucia.es/ojs/index.php/ramd/article/view/100/846>
- Gómez-Carmona, C. D., Bastida-Castillo, A., Rojas-Valverde, D., de la Cruz Sánchez, E., García-Rubio, J., Ibáñez, S. J., & Pino-Ortega, J. (2020). Lower-limb Dynamics of Muscle Oxygen Saturation During the Back-squat Exercise: Effects of Training Load and Effort Level. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(5), 1227–1236. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003400>
- Gordon, B. A., Benson, A. C., Bird, S. R., & Fraser, S. F. (2009). Resistance training improves metabolic health in type 2 diabetes: a systematic review. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 83(2), 157–175. <https://doi.org/10.1016/J.DIABRES.2008.11.024>
- Grassi, B, Gladden, L, Samaja, M, Sary, C., & Hogan, M. (1998). Faster adjustment of O₂ delivery does not affect V(O₂) on-kinetics in isolated in situ canine muscle. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 85(4), 1394–1403. <https://doi.org/10.1152/JAPPL.1998.85.4.1394>
- Grassi, Bruno, & Quaresima, V. (2016). Near-infrared spectroscopy and skeletal muscle oxidative function in vivo in health and disease: a review from an exercise physiology perspective . *Journal of Biomedical Optics*, 21(9), 091313. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.21.9.091313>
- Grosser, M., & Müller, H. (1992). *Desarrollo muscular: un nuevo concepto de musculación*.
- Gual, G., Fort-Vanmeerhaeghe, A., Romero-Rodríguez, D., & Tesch, P. (2016). Effects of In-Season Inertial Resistance Training With Eccentric Overload in a Sports Population at Risk for Patellar Tendinopathy. *Journal of Strength and Conditioning*

- Research*, 30(7), 1834–1842. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001286>
- Gundersen, K. (2016). Muscle memory and a new cellular model for muscle atrophy and hypertrophy. *Journal of Experimental Biology*, 219(2), 235–242. <https://doi.org/10.1242/jeb.124495>
- Hagstrom, A. D., Marshall, P. W., Lonsdale, C., Papalia, S., Cheema, B., Toben, C., Baune, B. T., Singh, Fiatarone, M. A., & Green, S. (2016). The effect of resistance training on markers of immune function and inflammation in previously sedentary women recovering from breast cancer: a randomized controlled trial. *Breast Cancer Research and Treatment*, 155(3), 471–482. <https://doi.org/10.1007/S10549-016-3688-0>
- Hajime, M. (2013). Clinical Application of NIRS. *Application of Near Infrared Spectroscopy in Biomedicine*, 59–74. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6252-1_4
- Hamaoka, T. (2013). In-Vivo NIRS and Muscle Oxidative Metabolism. In *Application of Near Infrared Spectroscopy in Biomedicine* (pp. 75–91). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6252-1>
- Hamaoka, T., McCully, K. K., Niwayama, M., & Chance, B. (2011). The use of muscle near-infrared spectroscopy in sport, health and medical sciences: recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1098/RSTA.2011.0298>
- Hammer, S. M., Alexander, A. M., Didier, K. D., Huckaby, L. M., & Barstow, T. J. (2020). Limb blood flow and muscle oxygenation responses during handgrip exercise above vs. below critical force. *Microvascular Research*, 131, 104002. <https://doi.org/10.1016/j.mvr.2020.104002>
- Hampson, N., & Piantadosi, C. (1988). Near infrared monitoring of human skeletal muscle oxygenation during forearm ischemia. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 64(6), 2449–2457. <https://doi.org/10.1152/JAPPL.1988.64.6.2449>
- Hearon, C. M., & Dinunno, F. A. (2016). Regulation of skeletal muscle blood flow during exercise in ageing humans. In *Journal of Physiology* (Vol. 594, Issue 8, pp. 2261–2273). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1113/JJP270593>

- Hedayatpour, N., & Falla, D. (2015). Physiological and Neural Adaptations to Eccentric Exercise: Mechanisms and Considerations for Training. *BioMed Research International*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/193741>
- Heinonen, I., Kemppainen, J., Kaskinoro, K., Peltonen, J., Borra, R., Lindroos, M., Oikonen, V., Nuutila, P., Knuuti, J., R, B., & KK, K. (2010). Regulation of human skeletal muscle perfusion and its heterogeneity during exercise in moderate hypoxia. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 299(1). <https://doi.org/10.1152/AJPREGU.00056.2010>
- Hessel, A. L., Lindstedt, S. L., & Nishikawa, K. C. (2017). Physiological Mechanisms of Eccentric Contraction and Its Applications: A Role for the Giant Titin Protein. *Frontiers in Physiology*, 0(FEB), 70. <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2017.00070>
- Hody, S., Croisier, J.-L., Bury, T., Rogister, B., & Leprince, P. (2019). Eccentric Muscle Contractions: Risks and Benefits. *Frontiers in Physiology*, 10(MAY). <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2019.00536>
- Hoffman, J. R., Im, J., Rundell, K. W., Kang, J., Nioka, S., Speirling, B. A., Kime, R., & Chance, B. (2003). Effect of Muscle Oxygenation during Resistance Exercise on Anabolic Hormone Response. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(11), 1929–1934. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000093613.30362.DF>
- Hong, R. A., & Kim, S. (2018). Effects of Resistance Exercise on Bone Health. *Endocrinology and Metabolism (Seoul, Korea)*, 33(4), 435–444. <https://doi.org/10.3803/ENM.2018.33.4.435>
- Hopkins, W. G. (2015). Spreadsheets for analysis of validity and reliability. *Sport Science*, 19, 36–42. <https://www.sportsci.org/2015/ValidRely.htm>
- Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., & Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. In *Medicine and Science in Sports and Exercise* (Vol. 41, Issue 1, pp. 3–12). <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31818cb278>
- Hug, F., Laplaud, D., Lucia, A., & Grelot, L. (2006). EMG threshold determination in eight lower limb muscles during cycling exercise: A pilot study. *International Journal of Sports Medicine*, 27(6), 456–462. <https://doi.org/10.1055/s-2005-865787>
- Humon. (n.d.). *Humon Hex, Especificaciones técnicas 2020*.

<https://humon.es/especificaciones-tecnicas/>

- Husmann, F., Mittlmeier, T., Bruhn, S., Zschorlich, V., & Behrens, M. (2018). Impact of Blood Flow Restriction Exercise on Muscle Fatigue Development and Recovery. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 50(3), 436–446. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001475>
- Inder, J., Carlson, D., Dieberg, G., McFarlane, J., Hess, N., & Smart, N. (2016). Isometric exercise training for blood pressure management: a systematic review and meta-analysis to optimize benefit. *Hypertension Research : Official Journal of the Japanese Society of Hypertension*, 39(2), 89–94. <https://doi.org/10.1038/HR.2015.111>
- Isner-Horobeti, M., Dufour, S., Autravers, P., Geny, B., Coudeyre, E., & Richard, R. (2013). Eccentric exercise training: modalities, applications and perspectives. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 43(6), 483–512. <https://doi.org/10.1007/S40279-013-0052-Y>
- James, L. P., Roberts, L. A., Haff, G. G., Kelly, V. G., & Beckman, E. M. (2017). Validity and Reliability of a Portable Isometric Mid-Thigh Clean Pull. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(5), 1378–1386. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001201>
- Jerez-Mayorga, D., Huerta-Ojeda, Á., Chiroso-Ríos, L., Guede-Rojas, F., Guzmán-Guzmán, I., Intelangelo, L., Miranda-Fuentes, C., & Delgado-Floody, P. (2021). Test-Retest Reliability of Functional Electromechanical Dynamometer on Five Sit-to-Stand Measures in Healthy Young Adults. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(13). <https://doi.org/10.3390/IJERPH18136829>
- Jerez-Mayorga, Daniel, Ríos, L. J. C., Reyes, A., Delgado-Floody, P., Payer, R. M., & Requena, I. M. G. (2019). Muscle quality index and isometric strength in older adults with hip osteoarthritis. *PeerJ*, 2019(8), e7471. <https://doi.org/10.7717/peerj.7471>
- Jochem, C., Leitzmann, M., Volaklis, K., Aune, D., & Strasser, B. (2019). Association Between Muscular Strength and Mortality in Clinical Populations: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of the American Medical Directors Association*, 20(10), 1213–1223. <https://doi.org/10.1016/j.jamda.2019.05.015>
- Julian, V., Thivel, D., Costes, F., Touron, J., Boirie, Y., Pereira, B., Perrault, H., Duclos, M.,

- & Richard, R. (2018). Eccentric Training Improves Body Composition by Inducing Mechanical and Metabolic Adaptations: A Promising Approach for Overweight and Obese Individuals. *Frontiers in Physiology*, 9(AUG). <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2018.01013>
- JungHoon, L., DoHoun, K., & ChangKeun, K. (2017). Resistance Training for Glycemic Control, Muscular Strength, and Lean Body Mass in Old Type 2 Diabetic Patients: A Meta-Analysis. *Diabetes Therapy: Research, Treatment and Education of Diabetes and Related Disorders*, 8(3), 459–473. <https://doi.org/10.1007/S13300-017-0258-3>
- Kannus, P. (1994). Isokinetic evaluation of muscular performance: implications for muscle testing and rehabilitation. *International Journal of Sports Medicine*, 15 Suppl 1(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1055/S-2007-1021104>
- Keitaro, K., Shigaki, T., & Ikebukuro, T. (2017). Effects of plyometric and isometric training on muscle and tendon stiffness in vivo. *Physiological Reports*, 5(15). <https://doi.org/10.14814/PHY2.13374>
- Kellawan, J. M., Bentley, R. F., Bravo, M. F., Moynes, J. S., & Tschakovsky, M. E. (2014). Does oxygen delivery explain interindividual variation in forearm critical impulse? *Physiological Reports*, 2(11). <https://doi.org/10.14814/phy2.12203>
- Kelley, G., & Kelley, K. (2000). Progressive resistance exercise and resting blood pressure: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Hypertension (Dallas, Tex. : 1979)*, 35(3), 838–843. <https://doi.org/10.1161/01.HYP.35.3.838>
- Kelln, B. M., McKeon, P. O., Gontkof, L. M., & Hertel, J. (2008). Hand-held dynamometry: reliability of lower extremity muscle testing in healthy, physically active, young adults. *Journal of Sport Rehabilitation*, 17(2), 160–170. <https://doi.org/10.1123/JSR.17.2.160>
- Keum, N., Bao, Y., Smith-Warner, S., Orav, J., Wu, K., Fuchs, C., & Giovannucci, E. (2016). Association of Physical Activity by Type and Intensity With Digestive System Cancer Risk. *JAMA Oncology*, 2(9), 1146–1153. <https://doi.org/10.1001/JAMAONCOL.2016.0740>
- Kirby, B. S., Clark, D. A., Bradley, E. M., & Wilkins, B. W. (2021). The Balance of Muscle Oxygen Supply and Demand Reveals Critical Metabolic Rate and Predicts Time to

- Exhaustion. *Journal of Applied Physiology*, japplphysiol.00058.2021.
<https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00058.2021>
- Koga, S., Barstow, T. J., Okushima, D., Rossiter, H. B., Kondo, N., Ohmae, E., & Poole, D. C. (2015). Validation of a high-power, time-resolved, near-infrared spectroscopy system for measurement of superficial and deep muscle deoxygenation during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 118(11), 1435–1442.
<https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01003.2014>
- Kraemer, W. J., & Newton, R. U. (2000). Training for Muscular Power. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 11(2), 341–368.
[https://doi.org/10.1016/S1047-9651\(18\)30133-5](https://doi.org/10.1016/S1047-9651(18)30133-5)
- Kraemer, William J.; & Howard G., K. (1987). Terminology and Measurement in Exercise Performance. *Article in The Journal of Strength and Conditioning Research*.
<https://doi.org/10.1519/00124278-198702000-00001>
- Krieger, J. (2010). Single vs. multiple sets of resistance exercise for muscle hypertrophy: a meta-analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(4), 1150–1159.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0B013E3181D4D436>
- Krzysztofik, M., Wilk, M., Wojdała, G., & Gołaś, A. (2019). Maximizing Muscle Hypertrophy: A Systematic Review of Advanced Resistance Training Techniques and Methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(24). <https://doi.org/10.3390/IJERPH16244897>
- LaStayo, P., Marcus, R., Dibble, L., Frajacomio, F., & Lindstedt, S. (2014). Eccentric exercise in rehabilitation: safety, feasibility, and application. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 116(11), 1426–1434.
<https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.00008.2013>
- Lauretani, F., Meschi, T., Ticinesi, A., & Maggio, M. (2017). “Brain-muscle loop” in the fragility of older persons: from pathophysiology to new organizing models. *Aging Clinical and Experimental Research*, 29(6), 1305–1311.
<https://doi.org/10.1007/S40520-017-0729-4>
- Lavie, C. J., Ozemek, C., Carbone, S., Katzmarzyk, P. T., & Blair, S. N. (2019). Sedentary Behavior, Exercise, and Cardiovascular Health. *Circulation Research*, 124(5), 799–815. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.118.312669>

- Lavin, K. M., Roberts, B. M., Fry, C. S., Moro, T., Rasmussen, B. B., & Bamman, M. M. (2019). *The Importance of Resistance Exercise Training to Combat Neuromuscular Aging*. <https://doi.org/10.1152/physiol.00044.2018>
- Lee, E. C., Fragala, M. S., Kavouras, S. A., Queen, R. M., Pryor, J. L., & Casa, D. J. (2017). Biomarkers in Sports and Exercise: Tracking Health, Performance, and Recovery in Athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *31*(10), 2920. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002122>
- Levinger, P., Dunn, J., Bifera, N., Butson, M., Elias, G., & Hill, K. (2017). High-speed resistance training and balance training for people with knee osteoarthritis to reduce falls risk: study protocol for a pilot randomized controlled trial. *Trials*, *18*(1). <https://doi.org/10.1186/S13063-017-2129-7>
- Liu-Ambrose, T., & Donaldson, M. (2009). Exercise and cognition in older adults: is there a role for resistance training programmes? *British Journal of Sports Medicine*, *43*(1), 25–27. <https://doi.org/10.1136/BJSM.2008.055616>
- López Calbet, J., & Dorado García, C. (2006). Fatiga, dolor muscular tardío y sobreentrenamiento. In *Fisiología del Ejercicio* (Editorial, pp. 755–906).
- López Chicharro, J., & Fernández Vaquero, A. (2006). Fuentes energéticas en el ejercicio. In *Fisiología del Ejercicio* (3ª Edición, pp. 183–279).
- Lu, T., Hsu, H., Chang, L., & Chen, H. (2007). Enhancing the examiner's resisting force improves the reliability of manual muscle strength measurements: comparison of a new device with hand-held dynamometry. *Journal of Rehabilitation Medicine*, *39*(9), 679–684. <https://doi.org/10.2340/16501977-0107>
- Lucero, A. A., Addae, G., Lawrence, W., Neway, B., Credeur, D. P., Faulkner, J., Rowlands, D., & Stoner, L. (2018). Reliability of muscle blood flow and oxygen consumption response from exercise using near-infrared spectroscopy. *Experimental Physiology*, *103*(1), 90–100. <https://doi.org/10.1113/EP086537>
- Lum, D., & Barbosa, T. M. (2019). Brief Review: Effects of Isometric Strength Training on Strength and Dynamic Performance. *International Journal of Sports Medicine*, *40*(6), 363–375. <https://doi.org/10.1055/A-0863-4539>
- MacDonald, H., Johnson, J., Huedo-Medina, T., Livingston, J., Forsyth, K., Kraemer, W., Farinatti, P., & Pescatello, L. (2016). Dynamic Resistance Training as Stand-Alone

- Antihypertensive Lifestyle Therapy: A Meta-Analysis. *Journal of the American Heart Association*, 5(10). <https://doi.org/10.1161/JAHA.116.003231>
- Maestroni, L., Read, P., Bishop, C., Papadopoulos, K., Suchomel, T. J., Comfort, P., & Turner, A. (2020). The Benefits of Strength Training on Musculoskeletal System Health: Practical Applications for Interdisciplinary Care. In *Sports Medicine* (Vol. 50, Issue 8, pp. 1431–1450). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01309-5>
- Magni, N., McNair, P., & Rice, D. (2017). The effects of resistance training on muscle strength, joint pain, and hand function in individuals with hand osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis. *Arthritis Research & Therapy*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/S13075-017-1348-3>
- Mancini, D. M., Bolinger, L., Li, H., Kendrick, K., Chance, B., & Wilson, J. R. (1994). Validation of near-infrared spectroscopy in humans. *Journal of Applied Physiology*, 77(6), 2740–2747. <https://doi.org/10.1152/jappl.1994.77.6.2740>
- Martínez-García, D., Rodríguez-Perea, A., Barboza, P., Ulloa-Díaz, D., Jerez-Mayorga, D., Chiroso, I., & Chiroso Ríos, L. (2020). Reliability of a standing isokinetic shoulder rotators strength test using a functional electromechanical dynamometer: effects of velocity. *PeerJ*, 8. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.9951>
- Martínez-García, D., Rodríguez-Perea, A., Huerta-Ojeda, A., Jerez-Mayorga, D., Aguilar-Martínez, D., Chiroso-Rios, I., Ruiz-Fuentes, P., & Chiroso-Rios, L. (2021). Effects of Pre-Activation with Variable Intra-Repetition Resistance on Throwing Velocity in Female Handball Players: a Methodological Proposal. *Journal of Human Kinetics*, 77(1), 235–244. <https://doi.org/10.2478/HUKIN-2021-0022>
- Mary E, T., & Christiana S, W. (1997). Falls, injuries due to falls, and the risk of admission to a nursing home. *The New England Journal of Medicine*, 337(18), 1279–1284. <https://doi.org/10.1056/NEJM199710303371806>
- McGregor, R. A., Cameron-Smith, D., & Poppitt, S. D. (2014). It is not just muscle mass: A review of muscle quality, composition and metabolism during ageing as determinants of muscle function and mobility in later life. In *Longevity and Healthspan* (Vol. 3, Issue 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/2046-2395-3-9>

- McGuigan, M., Newton, M., Winchester, J., & Nelson, A. (2010). Relationship between isometric and dynamic strength in recreationally trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(9), 2570–2573. <https://doi.org/10.1519/JSC.0B013E3181ECD381>
- Mcleod, J., Stokes, T., & Phillips, S. (2019). Resistance Exercise Training as a Primary Countermeasure to Age-Related Chronic Disease. *Frontiers in Physiology*, 10(JUN). <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2019.00645>
- McManus, C. J., Collison, J., & Cooper, C. E. (2018). Performance comparison of the MOXY and PortaMon near-infrared spectroscopy muscle oximeters at rest and during exercise. *Journal of Biomedical Optics*, 23(1), 1–14. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.23.1.015007>
- Mead, A. C., McGlynn, M. L., & Slivka, D. R. (2021). Acute effects of functional dry needling on skeletal muscle function. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, 26, 123–127. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2020.12.006>
- Meyer, C., Corten, K., Wesseling, M., Peers, K., Simon, J.-P., Jonkers, I., & Desloovere, K. (2013). Test-retest reliability of innovated strength tests for hip muscles. *PLoS One*, 8(11). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0081149>
- Mike, J., Kerksick, C. M., & Kravitz, L. (2015). How to incorporate eccentric training into a resistance training program. *Strength and Conditioning Journal*, 37(1), 5–17. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000114>
- Miranda-Fuentes, C., Chiroso-Ríos, L. J., Guisado-Requena, I. M., Delgado-Floody, P., & Jerez-Mayorga, D. (2021). Changes in Muscle Oxygen Saturation Measured Using Wireless Near-Infrared Spectroscopy in Resistance Training: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), 4293. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084293>
- Miranda-Fuentes, C., Guisado-Requena, I. M., Delgado-Floody, P., Arias-Poblete, L., Pérez-Castilla, A., Jerez-Mayorga, D., & Chiroso-Rios, L. J. (2020). Reliability of low-cost near-infrared spectroscopy in the determination of muscular oxygen saturation and hemoglobin concentration during rest, isometric and dynamic strength activity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238824>

- Miura, H., McCully, K., Hong, L., Nioka, S., & Chance, B. (2001). Regional Difference of Muscle Oxygen Saturation and Blood Volume during Exercise Determined by Near Infrared Imaging Device. *The Japanese Journal of Physiology*, 51(5), 599–606. <https://doi.org/10.2170/jjphysiol.51.599>
- Moalla, W., Elloumi, M., Chamari, K., Dupont, G., Maingourd, Y., Tabka, Z., & Ahmaidi, S. (2012). Training effects on peripheral muscle oxygenation and performance in children with congenital heart diseases. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*, 37(4), 621–630. <https://doi.org/10.1139/H2012-036>
- Moeyaert, M., Maggin, D., & Verkuilen, J. (2016). Reliability, Validity, and Usability of Data Extraction Programs for Single-Case Research Designs. *Behavior Modification*, 40(6), 874–900. <https://doi.org/10.1177/0145445516645763>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., Altman, D., Antes, G., Atkins, D., Barbour, V., Barrowman, N., Berlin, J. A., Clark, J., Clarke, M., Cook, D., D'Amico, R., Deeks, J. J., Devereaux, P. J., Dickersin, K., Egger, M., Ernst, E., ... Tugwell, P. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. In *PLoS Medicine* (Vol. 6, Issue 7, p. e1000097). PLoS Med. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Myers, A., Nicholas, B., & Fakhoury, J. D. (2017). Resistance training for children and adolescents. *Translational Pediatrics*, 6(3), 137–143. <https://doi.org/10.21037/TP.2017.04.01>
- Myers, C. (2020). Muscle Oxygenation Applications to Endurance Training. In *Online Journal of Complementary & Alternative Medicine* (Vol. 1, Issue 1). Iris Publishers. <https://irispublishers.com/apoaj/fulltext/muscle-oxygenation-applications-to-endurance-training.ID.000501.php>
- Ochi, E., Tsuchiya, Yosuke, & Nosaka, K. (2016). Differences in post-exercise T2 relaxation time changes between eccentric and concentric contractions of the elbow flexors. *European Journal of Applied Physiology*, 116(11–12), 2145–2154. <https://doi.org/10.1007/S00421-016-3462-3>
- Okushima, D., Poole, D. C., Barstow, T. J., Kondo, N., Chin, L. M. K., & Koga, S. (2020). Effect of differential muscle activation patterns on muscle deoxygenation and microvascular haemoglobin regulation. *Experimental Physiology*, 105(3), 531–541.

<https://doi.org/10.1113/EP088322>

Ordway, G. A., & Garry, D. J. (2004). Myoglobin: an essential hemoprotein in striated muscle. *Journal of Experimental Biology*, 207(20), 3441–3446.

<https://doi.org/10.1242/JEB.01172>

Palacios, G., Pedrero-Chamizo, R., Palacios, N., Maroto-Sánchez, B., Aznar, S., & González-Gross, M. (2015). Biomarcadores de la actividad física y del deporte. *Rev Esp Nutr Comunitaria*, 21, 235–242. <https://doi.org/10.14642/RENC.2015.21.sup1.5070>

Paradis-Deschênes, P., Joanisse, D. R., & Billaut, F. (2016). Ischemic preconditioning increases muscle perfusion, oxygen uptake, and force in strength-trained athletes. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition et Metabolisme*, 41(9), 938–944. <https://doi.org/10.1139/apnm-2015-0561>

Paradis-Deschênes, P., Joanisse, D. R., & Billaut, F. (2017). Sex-specific impact of ischemic preconditioning on tissue oxygenation and maximal concentric force. *Frontiers in Physiology*, 7(JAN). <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00674>

Paschalis, V., Nikolaidis, M., Giakas, G., Theodorou, A., Sakellariou, G., Fatouros, I., Koutedakis, Y., & Jamurtas, A. (2010). Beneficial changes in energy expenditure and lipid profile after eccentric exercise in overweight and lean women. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(1). <https://doi.org/10.1111/J.1600-0838.2009.00920.X>

Pearcey, G. E. P., Alizedah, S., Power, K. E., & Button, D. C. (2021). Chronic resistance training: is it time to rethink the time course of neural contributions to strength gain? *European Journal of Applied Physiology* 2021 121:9, 121(9), 2413–2422. <https://doi.org/10.1007/S00421-021-04730-4>

Pedersen, K. K., Madsen, M. K., Hvid, L. G., & Overgaard, K. (2019). Concentric strength training at optimal or short muscle length improves strength equally but does not reduce fatigability of hamstring muscles. *Physiological Reports*, 7(16). <https://doi.org/10.14814/PHY2.14196>

Peikon, E. (2020). The Future is NIRS : Muscle Oxygen Saturation as an Estimation of The Power-Duration Relationship. *Anat & Physiol Open Access J*, 1(1).

Peñailillo, L., Blazevich, A., Numazawa, H., & Nosaka, K. (2013). Metabolic and muscle damage profiles of concentric versus repeated eccentric cycling. *Medicine and*

- Science in Sports and Exercise*, 45(9), 1773–1781.
<https://doi.org/10.1249/MSS.0B013E31828F8A73>
- Pereira, Marta I.R., Gomes, P. S. C., & Bhambhani, Y. N. (2007). A brief review of the use of near infrared spectroscopy with particular interest in resistance exercise. In *Sports Medicine* (Vol. 37, Issue 7, pp. 615–624). Sports Med.
<https://doi.org/10.2165/00007256-200737070-00005>
- Pereira, Marta Inez R., Gomes, P. S. C., & Bhambhani, Y. N. (2009). Acute effects of sustained isometric knee extension on cerebral and muscle oxygenation responses. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 29(4), 300–308.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-097X.2009.00870.x>
- Pérez-Castilla, A., Comfort, P., McMahon, J., Pestaña-Melero, F. L., & García-Ramos, A. (2020). Comparison of the Force-, Velocity-, and Power-Time Curves Between the Concentric-Only and Eccentric-Concentric Bench Press Exercises. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(6), 1618–1624.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002448>
- Perrey, S., & Ferrari, M. (2018a). Muscle Oximetry in Sports Science: A Systematic Review. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 48(3), 597–616.
<https://doi.org/10.1007/s40279-017-0820-1>
- Perrey, S., & Ferrari, M. (2018b). Muscle Oximetry in Sports Science: A Systematic Review. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 48(3), 597–616.
<https://doi.org/10.1007/s40279-017-0820-1>
- Pescatello, L., MacDonald, H., L, L., & Johnson, B. (2015). Exercise for Hypertension: A Prescription Update Integrating Existing Recommendations with Emerging Research. *Current Hypertension Reports*, 17(11).
<https://doi.org/10.1007/S11906-015-0600-Y>
- Piercy, K., Troiano, R., Ballard, R., Carlson, S., Fulton, J., Galuska, D., George, S., & Olson, R. (2018). The Physical Activity Guidelines for Americans. *JAMA*, 320(19), 2020–2028. <https://doi.org/10.1001/JAMA.2018.14854>
- Piiper, J. (2000). Perfusion, diffusion and their heterogeneities limiting blood-tissue O₂ transfer in muscle. *Acta Physiologica Scandinavica*, 168(4), 603–607.
<https://doi.org/10.1046/J.1365-201X.2000.00711.X>

- Place, N., & Millet, G. Y. (2019). Quantification of Neuromuscular Fatigue: What Do We Do Wrong and Why? *Sports Medicine* 2019 50:3, 50(3), 439–447. <https://doi.org/10.1007/S40279-019-01203-9>
- Poole, D., Behnke, B., & Musch, T. (2021). The role of vascular function on exercise capacity in health and disease. *The Journal of Physiology*, 599(3), 889–910. <https://doi.org/10.1113/JP278931>
- Poole, D. C., & Richardson, R. S. (1997). Determinants of oxygen uptake: Implications for exercise testing. In *Sports Medicine* (Vol. 24, Issue 5, pp. 308–320). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.2165/00007256-199724050-00003>
- Proctor, D. N., Shen, P. H., Dietz, N. M., Eickhoff, T. J., Lawler, L. A., Ebersold, E. J., Loeffler, D. L., & Joyner, M. J. (1998). Reduced leg blood flow during dynamic exercise in older endurance-trained men. *Journal of Applied Physiology*, 85(1), 68–75. <https://doi.org/10.1152/jappl.1998.85.1.68>
- Reid, K., & Fielding, R. (2012). Skeletal muscle power: a critical determinant of physical functioning in older adults. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 40(1), 4–12. <https://doi.org/10.1097/JES.0B013E31823B5F13>
- Robert R, W. (2006). The underappreciated role of muscle in health and disease. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 84(3), 475–482. <https://doi.org/10.1093/AJCN/84.3.475>
- Rodrigo-Carranza, V., González-Mohíno, F., Turner, A. P., Rodríguez-Barbero, S., & González-Ravé, J. M. (2021). Using a Portable Near-infrared Spectroscopy Device to Estimate the Second Ventilatory Threshold. *International Journal of Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1055/a-1343-2127>
- Rodríguez-Perea, Á., Jerez-Mayorga, D., García-Ramos, A., Martínez-García, D., & Chiroso Ríos, L. J. (2021a). Reliability and concurrent validity of a functional electromechanical dynamometer device for the assessment of movement velocity. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1177/1754337120984883>
- Rodríguez-Perea, Á., Jerez-Mayorga, D., García-Ramos, A., Martínez-García, D., & Chiroso Ríos, L. J. (2021b). Reliability and concurrent validity of a functional electromechanical dynamometer device for the assessment of movement velocity.

- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 175433712098488. <https://doi.org/10.1177/1754337120984883>
- Rodriguez-Perea, A., Ríos, L. J. C., Martinez-Garcia, D., Ulloa-Díaz, D., Rojas, F. G., Jerez-Mayorga, D., & Rios, I. J. C. (2019). Reliability of isometric and isokinetic trunk flexor strength using a functional electromechanical dynamometer. *PeerJ*, 2019(10), e7883. <https://doi.org/10.7717/peerj.7883>
- Roig, M., O'Brien, K., Kirk, G., Murray, R., McKinnon, P., Shadgan, B., & Reid, W. (2009). The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: a systematic review with meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 43(8), 556–568. <https://doi.org/10.1136/BJSM.2008.051417>
- Saeidifard, F., Medina-Inojosa, J., West, C., Olson, T., Somers, V., Bonikowske, A., Prokop, L., Vinciguerra, M., & Lopez-Jimenez, F. (2019). The association of resistance training with mortality: A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Preventive Cardiology*, 26(15), 1647–1665. <https://doi.org/10.1177/2047487319850718>
- Sáez Sáez De Villarreal, E., Requena, B., & Newton, R. U. (2010). Does plyometric training improve strength performance? A meta-analysis. In *Journal of Science and Medicine in Sport* (Vol. 13, Issue 5, pp. 513–522). <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2009.08.005>
- Sampson, J., & Groeller, h. (2016). Is repetition failure critical for the development of muscle hypertrophy and strength? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(4), 375–383. <https://doi.org/10.1111/SMS.12445>
- Sardeli, A., Tomeleri, C. M., Cyrino, E., Fernhall, B., Cavaglieri, C. R., & Chacon-Mikahil, M. P. T. (2018). Effect of resistance training on inflammatory markers of older adults: A meta-analysis. *Experimental Gerontology*, 111, 188–196. <https://doi.org/10.1016/J.EXGER.2018.07.021>
- Schoenfeld, B. J. (2010). The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(10), 2857–2872. <https://doi.org/10.1519/JSC.0B013E3181E840F3>
- Schoenfeld, B. J., Contreras, B., Krieger, J. W., Grgic, J., Delcastillo, K., Belliard, R., & Alto,

- A. (2019). Resistance Training Volume Enhances Muscle Hypertrophy but Not Strength in Trained Men. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 51(1), 94–103. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001764>
- Schoenfeld, B. J., Ogborn, D., & Krieger, J. W. (2017). Dose-response relationship between weekly resistance training volume and increases in muscle mass: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Sports Sciences*, 35(11), 1073–1082. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1210197>
- Scholkmann, F., & Scherer-Vrana, A. (2020). Comparison of two NIRS tissue oximeters (moxy and nimo) for non-invasive assessment of muscle oxygenation and perfusion. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1232, 253–259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34461-0_32
- Schott, J., McCully, K., & Rutherford, O. M. (1995). The role of metabolites in strength training - II. Short versus long isometric contractions. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 71(4), 337–341. <https://doi.org/10.1007/BF00240414>
- Segal, R., Reid, R., Courneya, K., Sigal, R., Kenny, G., Prud'Homme, D., Malone, S., Wells, G., Scott, C., & Slovinc D'Angelo, M. (2009). Randomized controlled trial of resistance or aerobic exercise in men receiving radiation therapy for prostate cancer. *Journal of Clinical Oncology: Official Journal of the American Society of Clinical Oncology*, 27(3), 344–351. <https://doi.org/10.1200/JCO.2007.15.4963>
- Sesboué, B., & Guincestre, J. (2006). Muscular fatigue. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 49(6), 348–354. <https://doi.org/10.1016/J.ANNRMP.2006.04.020>
- Silva, B., Ramos, D., Bertolini, G. N., Freire, A., Leite, M., Camillo, C., Gobbo, L., & Ramos, E. (2019). Resistance exercise training improves mucociliary clearance in subjects with COPD: A randomized clinical trial. *Pulmonology*, 25(6), 340–347. <https://doi.org/10.1016/J.PULMOE.2019.01.001>
- Soren, N., & Bente Klarlund, P. (2008). Skeletal muscle as an immunogenic organ. *Current Opinion in Pharmacology*, 8(3), 346–351. <https://doi.org/10.1016/J.COPH.2008.02.005>
- Stamatakis, E., Lee, I. M., Bennie, J., Freeston, J., Hamer, M., O'Donovan, G., Ding, D.,

- Bauman, A., & Mavros, Y. (2018). Does Strength-Promoting Exercise Confer Unique Health Benefits? A Pooled Analysis of Data on 11 Population Cohorts With All-Cause, Cancer, and Cardiovascular Mortality Endpoints. *American Journal of Epidemiology*, 187(5), 1102–1112. <https://doi.org/10.1093/AJE/KWX345>
- Stark, T., Walker, B., Phillips, J., Fejer, R., & Beck, R. (2011). Hand-held dynamometry correlation with the gold standard isokinetic dynamometry: a systematic review. *PM & R: The Journal of Injury, Function, and Rehabilitation*, 3(5), 472–479. <https://doi.org/10.1016/J.PMRJ.2010.10.025>
- Staunton, C. A., Abt, G., Weaving, D., & Wundersitz, D. W. T. (2021). Misuse of the term 'load' in sport and exercise science. *Journal of Science and Medicine in Sport*. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMS.2021.08.013>
- Stenholm, S., Mehta, N. K., Elo, I. T., Heliövaara, M., Koskinen, S., & Aromaa, A. (2013). Obesity and muscle strength as long-term determinants of all-cause mortality—a 33-year follow-up of the Mini-Finland Health Examination Survey. *International Journal of Obesity* 2014 38:8, 38(8), 1126–1132. <https://doi.org/10.1038/ijo.2013.214>
- Stöggli, T., & Born, D.-P. (2021). Near Infrared Spectroscopy for Muscle Specific Analysis of Intensity and Fatigue during Cross-Country Skiing Competition—A Case Report. *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 2535, 21(7), 2535. <https://doi.org/10.3390/S21072535>
- Stone, K. J., Fryer, S. M., Ryan, T., & Stoner, L. (2016). The validity and reliability of continuous-wave near-infrared spectroscopy for the assessment of leg blood volume during an orthostatic challenge. *Atherosclerosis*, 251, 234–239. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2016.06.030>
- Strasser, B., Arvandi, M., & Siebert, U. (2012). Resistance training, visceral obesity and inflammatory response: a review of the evidence. *Obesity Reviews: An Official Journal of the International Association for the Study of Obesity*, 13(7), 578–591. <https://doi.org/10.1111/J.1467-789X.2012.00988.X>
- Stringer, W., Wasserman, K., Casaburi, R., Porszasz, J., Maehara, K., & French, W. (1994). Lactic acidosis as a facilitator of oxyhemoglobin dissociation during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 76(4), 1462–1467.

<https://doi.org/10.1152/jappl.1994.76.4.1462>

- Suchomel, T. J., Nimphius, S., & Stone, M. H. (2016). The Importance of Muscular Strength in Athletic Performance. In *Sports Medicine* (Vol. 46, Issue 10, pp. 1419–1449). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0486-0>
- Tamaki, T., Uchiyama, S., Tamura, T., & Nakano, S. (1994). Changes in muscle oxygenation during weight-lifting exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 68(6), 465–469. <https://doi.org/10.1007/BF00599514>
- Tanimoto, M., & Ishii, N. (2006). Effects of low-intensity resistance exercise with slow movement and tonic force generation on muscular function in young men. *Journal of Applied Physiology*, 100(4), 1150–1157. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00741.2005>
- Tew, G. A., Ruddock, A. D., & Saxton, J. M. (2010). Skin blood flow differentially affects near-infrared spectroscopy-derived measures of muscle oxygen saturation and blood volume at rest and during dynamic leg exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 110(5), 1083–1089. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1596-2>
- Timón, R., Ponce-González, J. G., González-Montesinos, J. L., Olcina, G., Pérez-Pérez, A., & Castro-Piñero, J. (2018). Inertial flywheel resistance training and muscle oxygen saturation. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 58(11), 1618–1624. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.17.07793-3>
- Touron, J., Perrault, H., Julian, V., Maisonnave, L., Deat, P., Auclair-Ronzaud, J., Salles, J., Walrand, S., Hermet, J., Rigaudiere, J., Lebecque, P., Malpuech-Brugere, C., Montaurier, C., Pereira, B., Coxam, V., Costes, F., & Richard, R. (2019). Impact of Eccentric or Concentric Training on Body Composition and Energy Expenditure. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 51(9), 1944–1953. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001992>
- Tremblay, M., Warburton, D., Janssen, I., Paterson, D., Latimer, A., Rhodes, R., Kho, M., Hicks, A., Leblanc, A., Zehr, L., Murumets, K., & Duggan, M. (2011). New Canadian physical activity guidelines. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 36(1), 36–46. <https://doi.org/10.1139/H11-009>

- Van Beekvelt, M., Borghuis, M., Van Engelen, B., Wevers, R., & Colier, W. (2001). Adipose tissue thickness affects in vivo quantitative near-IR spectroscopy in human skeletal muscle. *Clinical Science*, *101*(1), 21–28. <https://doi.org/10.1042/CS20000247>
- Van Beekvelt, M. C. P., Shoemaker, J. K., Tschakovsky, M. E., Hopman, M. T. E., & Hughson, R. L. (2001). Blood flow and muscle oxygen uptake at the onset and end of moderate and heavy dynamic forearm exercise. *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, *280*(6), 49–6. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.2001.280.6.r1741>
- Vanek, T., & Kohli, A. (2021). Biochemistry, Myoglobin. *StatPearls*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK544256/>
- Vega, E. C., Jerez-Mayorga, D., Payer, R. M., Jara, C. C., Guzman-Guzman, I., Ponce, A. R., & Chiroso, L. J. (2018). Validity and reliability of evaluating hip abductor strength using different normalization methods in a functional electromechanical device. *PLoS ONE*, *13*(8), 1–12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202248>
- Vieira, A., Blazeovich, A., Souza, N., Celes, R., Savio, A., Tufano, J. J., & Bottaro, M. (2018). Acute changes in muscle thickness and pennation angle in response to work-matched concentric and eccentric isokinetic exercise. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition et Metabolisme*, *43*(10), 1069–1074. <https://doi.org/10.1139/APNM-2018-0055>
- Wallace, B. J., Bergstrom, H. C., & Butterfield, T. A. (2018). Muscular bases and mechanisms of variable resistance training efficacy: <https://doi.org/10.1177/1747954118810240>, *13*(6), 1177–1188. <https://doi.org/10.1177/1747954118810240>
- Wang, B., Xu, G., Tian, Q., Sun, J., Sun, B., Zhang, L., Luo, Q.-M., & Gong, H. (2012). Differences between the vastus lateralis and gastrocnemius lateralis in the assessment ability of breakpoints of muscle oxygenation for aerobic capacity indices during an incremental cycling exercise. *Journal of Sports Science and Medicine*, *11*(4), 606–613. <http://www.jssm.org>
- Wassenaar, E. B., & Van den Brand, J. G. H. (2005). Reliability of near-infrared spectroscopy in people with dark skin pigmentation. *Journal of Clinical Monitoring*

- and Computing*, 19(3), 195–199. <https://doi.org/10.1007/s10877-005-1655-0>
- Westcott, W. (2012). Resistance training is medicine: effects of strength training on health. *Current Sports Medicine Reports*, 11(4), 209–216. <https://doi.org/10.1249/JSR.0B013E31825DABB8>
- Weyand, P., Lee, C., Martinez-Ruiz, R., Bundle, M., Bellizzi, M., & Wright, S. (1999). High-speed running performance is largely unaffected by hypoxic reductions in aerobic power. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 86(6), 2059–2064. <https://doi.org/10.1152/JAPPL.1999.86.6.2059>
- Whelton, S., Chin, A., Xin, X., & He, J. (2002). Effect of aerobic exercise on blood pressure: a meta-analysis of randomized, controlled trials. *Annals of Internal Medicine*, 136(7), 493–503. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-136-7-200204020-00006>
- Wyon, M. A., & Koutedakis, Y. (2013). Muscular fatigue: considerations for dance. *Journal of Dance Medicine & Science: Official Publication of the International Association for Dance Medicine & Science*, 17(2), 63–69. <https://doi.org/10.12678/1089-313X.17.2.63>
- Yamashita, Y., & Niwayama, M. (2013). Principles and instrumentation. In *Application of Near Infrared Spectroscopy in Biomedicine* (pp. 1–19). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6252-1_1
- Yang, Z., Scott, C., Mao, C., Tang, J., & Farmer, A. (2014). Resistance exercise versus aerobic exercise for type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 44(4), 487–499. <https://doi.org/10.1007/S40279-013-0128-8>
- Yardley, J., Kenny, G., Perkins, B., Riddell, M., Balaa, N., Malcolm, J., Boulay, P., Khandwala, F., & Sigal, R. (2013). Resistance versus aerobic exercise: acute effects on glycemia in type 1 diabetes. *Diabetes Care*, 36(3), 537–542. <https://doi.org/10.2337/DC12-0963>
- Zheng, C., Zhang, X., Sheridan, S., Ho, R. S.-T., Sit, C. H.-P., Huang, Y., & Wong, S. H.-S. (2021). Effect of sedentary behavior interventions on vascular function in adults: A systematic review and meta-analysis. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 31(7), 1395–1410. <https://doi.org/10.1111/SMS.13947>

Anexos

18. Anexos

18.1 Anexo 1: Quality assessment based on modified Downs and Black checklist

All questions were scored on the following scale: yes 1, unable to determine 0 and no 0. For number 5: yes 2, partially 1, no 0.

1	Is the hypothesis/aim/objective of the study clearly described?
2	Are the main outcomes to be measured clearly described in the Introduction or Methods section?
3	Are the characteristics of the patients included in the study clearly described?
5	Are the distributions of principal confounders in each group of subjects to be compared clearly described?
6	Are the main findings of the study clearly described?
7	Does the study provide estimates of the random variability in the data for the main outcomes?
10	Have actual probability values been reported for the main outcomes except where the probability value is less than .001 (i. e. indicating $p = 0.043$ rather than $p < 0.05$)
11	Were the subjects asked to participate in the study representative of the entire population from which they were recruited?
12	Were those subjects who were prepared to participate representative of the entire population from which they were recruited?
14	Was an attempt made to blind study subjects to the intervention they have received?
15	Was an attempt made to blind those measuring the main outcomes of the intervention?
16	If any of the results of the study were based on 'data dredging', was this made clear?
18	Were the statistical tests used to assess the main outcomes appropriate?
20	Were the main outcome measures used accurate (valid and reliable)?
25	Was there adequate adjustment for confounding in the analyses from which the main findings were drawn?

18.2 Anexo 2: Certificado Comité de Ética Universidad de Granada.



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

Vicerrectorado de Investigación y Transferencia

COMITE DE ETICA EN INVESTIGACION DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA

La Comisión de Ética en Investigación de la Universidad de Granada, visto el informe preceptivo emitido por la Presidenta del Comité en Investigación Humana, tras la valoración colegiada del Comité en sesión plenaria, en el que se hace constar que la investigación propuesta respeta los principios establecidos en la legislación internacional y nacional en el ámbito de la biomedicina, la biotecnología y la bioética, así como los derechos derivados de la protección de datos de carácter personal,

Emite un Informe Favorable en relación a la investigación titulada: 'EFECTOS DEL ENTRENAMIENTO DE FUERZA MUSCULAR SOBRE EL GASTO ENERGÉTICO, FATIGA Y BIOMARCADORES DE ACTIVIDAD FÍSICA EN ADULTOS SANOS' que dirige D./Dña. CLAUDIA MIRANDA FUENTES, con NIF F11692411, quedando registrada con el nº: 993/CEIH/2019.

Granada, a 22 de Septiembre de 2020.

HERRERA
VIEDMA
ENRIQUE -
26478489S

Firmado
digitalmente por
HERRERA VIEDMA
ENRIQUE -
26478489S
Fecha: 2020.09.22
13:27:27 +02'00'

EL PRESIDENTE
Fdo: Enrique Herrera Viedma

EL SECRETARIO
Fdo: Francisco Javier O'Valle Ravassa

