

Caracterización y comparación de variables cardiorrespiratorias en escalada boulder durante dos rutas de diferente nivel de dificultad

Characterization and comparison of cardiorespiratory variables in boulder climbing during two routes of different difficulty levels

Andrés Santiago Parodi-Feye

Universidad de la República (Uruguay)

(andresparodi2005@yahoo.com) (<https://orcid.org/0000-0003-3498-352X>)

Sofía Barriola

Universidad de la República (Uruguay)

(sofi.bbaridon@gmail.com) (<https://orcid.org/0009-0002-1228-7005>)

Juan Manuel Casais-Kortysz

Universidad de la República (Uruguay)

(juan.casais.k@gmail.com) (<https://orcid.org/0009-0009-5824-452X>)

Manuela Lev-Rodríguez

Universidad de la República (Uruguay)

(manulevro@gmail.com) (<https://orcid.org/0009-0009-6218-3504>)

Bruno Escajal

Universidad de la República (Uruguay)

(brunoescajal@hotmail.com) (<https://orcid.org/0009-0009-6908-5472>)

Carlos Magallanes

Universidad de la República (Uruguay)

(camagallanes@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-9506-6947>)

Información del manuscrito:

Recibido/Received: 15/07/25

Revisado/Reviewed: 12/11/25

Aceptado/Accepted: 15/12/25

RESUMEN

Palabras clave:

Escalada boulder, escalada deportiva, metabolismo aeróbico, umbrales ventilatorios

La evidencia sobre variables fisiológicas en la escalada boulder es relativamente escasa. En el presente estudio se estudiaron las respuestas cardiorrespiratorias en diferentes niveles de esta modalidad. Catorce escaladores experimentados (6 mujeres; edad = 32.8 ± 6.2 años) realizaron un test progresivo maximal en cicloergómetro, determinándose el VO_2 , frecuencia cardíaca (FC) y volumen minuto respiratorio (VMR) picos, así como los umbrales VT1 y VT2. Posteriormente, los sujetos realizaron esfuerzos de escalada de niveles V1 y V3, de cuatro minutos cada uno, donde se midieron los valores de VO_2 , FC y VMR picos, así como los promedios de VO_2 relativo de cada minuto. La comparación entre esfuerzos se realizó mediante ANOVA de medidas repetidas. Respecto al VO_2 y el VMR, se observó una diferencia significativa entre el resultado maximal y los niveles V1 y V3 ($p < 0.05$); aunque no entre ambos niveles ($p > 0.05$). En relación a FC, las diferencias en ningún caso alcanzaron significancia ($p > 0.05$). En ambas modalidades los valores de VO_2 correspondientes al primer minuto

estuvieron por debajo del VT1. Para V1, el promedio de los minutos 2 y 3 se encontró en zona interumbral; mientras que el minuto 4 coincidió con el VT2. En V3, el promedio del minuto 2 se observó en zona interumbral, mientras que el minuto 3 coincidió con el VT2. Este último fue superado en el minuto 4. La disociación observada entre FC y VO₂, indican que la FC por sí sola no constituiría un indicador fiable de la carga de esfuerzo.

ABSTRACT

Keywords:

Boulder climbing, sport climbing, aerobic metabolism, ventilatory thresholds

Evidence on physiological variables in bouldering climbing is relatively scarce. In the present study, cardiorespiratory responses were studied at different levels of this modality. Fourteen experienced climbers (6 women; age = 32.8±6.2 years) performed a maximal progressive test on a cycloergometer, determining peak VO₂, heart rate (HR) and respiratory minute volume (RMV), as well as VT1 and VT2 thresholds. Subsequently, the subjects performed climbing efforts of levels V1 and V3, of four minutes each, where peak VO₂, HR and RMV values were measured, as well as the relative VO₂ averages for each minute. Comparison between efforts was performed by repeated measures ANOVA. Regarding VO₂ and RMV, a significant difference was observed between the maximal result and the V1 and V3 levels ($p < 0.05$); although not between the two levels ($p > 0.05$). In relation to HR, the differences did not reach significance in any case ($p > 0.05$). In both modalities, VO₂ values corresponding to the first minute were below VT1. For V1, the average of minutes 2 and 3 was in the interthreshold zone, while minute 4 coincided with VT2. For V3, the minute 2 average was observed in the interthreshold zone, while minute 3 coincided with VT2. The latter was exceeded in minute 4. The dissociation observed between HR and VO₂ indicates that HR alone would not be a reliable indicator of exertion load.

Introducción

La escalada deportiva, incluida por primera vez como deporte olímpico en los juegos de Tokio 2020, ha experimentado un importante crecimiento a nivel global en los últimos años. De hecho, la Federación Internacional de Escalada Deportiva (International Federation of Sport Climbing [IFSC], 2020) estima que para el año 2019 al menos 140 países contaban con paredes adaptadas para la práctica de este deporte, incluyendo a más de 44.5 millones de practicantes en todo el mundo en sus modalidades indoor y outdoor. Con la mencionada incorporación y consolidación de esta disciplina en los juegos olímpicos, es esperable que estas cifras se hayan incrementado aún más. En lo que respecta a Uruguay, si bien no hay cifras oficiales de practicantes, existen al menos seis gimnasios dedicados a su enseñanza y competencia (Asociación Uruguaya de Escalada [AUDE], 2025). Sin embargo, y a pesar de su creciente popularidad, son relativamente escasos los trabajos que han analizado y comparado variables fisiológicas vinculadas al rendimiento en distintos niveles de dificultad de la modalidad boulder. Asimismo, hasta donde llega el conocimiento de los autores no hay antecedentes realizados en Uruguay.

Las características del esfuerzo de escalada (involucrando la contracción simultánea de grandes grupos musculares, en forma continua y durante un período de tiempo de varios minutos) hacen que la capacidad cardiovascular y respiratoria se constituyan como determinantes fundamentales para el logro de la máxima performance (Callender et al., 2021). En este sentido, se ha registrado un componente aeróbico significativo ($\approx 75\%$ del VO_2 máx) y demandantes respuestas cardiorrespiratorias durante el esfuerzo, que persisten incluso varios minutos durante la recuperación (Mermier et al., 1997). Sin dejar de reconocer la importante contribución de las vías energéticas no dependientes del oxígeno, la escalada deportiva ha sido tradicionalmente considerada como un deporte de resistencia aeróbica (Gómez et al., 2017).

El propósito del presente estudio fue caracterizar y comparar respuestas fisiológicas cardiorrespiratorias de dos rutas de escalada boulder de diferente dificultad, en particular V1 y V3. Se estableció como objetivo secundario, la determinación de la percepción de esfuerzo (Rate of Perceived Exertion, RPE) correspondiente al total de la ruta, así como su posible diferencia según el nivel considerado. Los resultados obtenidos podrían representar un aporte novedoso, ayudando a determinar y diferenciar las demandas fisiológicas acaecidas durante el esfuerzo en ambas modalidades; siendo además un insumo potencialmente beneficioso para escaladores, entrenadores e investigadores en el área, en su búsqueda de estrategias que optimicen los procesos de entrenamiento y rendimiento en este deporte.

Método

El presente proyecto fue aprobado por el comité de ética del Instituto Superior de Educación Física (ISEF) de la Universidad de la República (Udelar), Uruguay (resolución nro. 5/2021 del 18 de mayo de 2021).

Sujetos

Los sujetos fueron seleccionados por conveniencia, debido al vínculo de una de las autoras del presente trabajo (M.L.), en su calidad de docente y escaladora, con la institución deportiva donde se llevó adelante el estudio. Fueron establecidos como

criterios de inclusión: i) ser escaladores mayores de edad (>18 años), practicantes de escalada deportiva en su modalidad boulder con al menos un año de experiencia; ii) tener un nivel autopercebido superior a V3; iii) no ser fumador; y iv) no presentar patologías osteoarticulares, respiratorias o de cualquier otro tipo que pudieran afectar el rendimiento de escalada.

Se seleccionaron inicialmente 22 voluntarios de ambos sexos. Todos ellos fueron informados oralmente y en forma escrita sobre los objetivos y características del estudio, luego de lo cual leyeron y firmaron un consentimiento informado.

Procedimientos

Evaluaciones de laboratorio

Las evaluaciones iniciales fueron realizadas en el Laboratorio de Fisiología del Ejercicio perteneciente al Instituto Superior de Educación Física (ISEF), Udelar, sede Parque Batlle, Montevideo. En primer lugar, luego de obtener datos del sujeto referidos a su edad, sexo, y nivel autopercebido de escalada, se determinó su masa corporal y porcentaje de masa grasa utilizando un sistema de bioimpedancia eléctrica (InBody-120, InBody Co., Corea), así como su altura mediante un estadiómetro portátil (SECA 213, SECA, Alemania).

Posteriormente, los sujetos realizaron una prueba de esfuerzo incremental máxima en cicloergómetro (Cyclus 2; RBM elektronik-automation GmbH, Leipzig, Alemania). El protocolo se inició con una fase de calentamiento de dos minutos de duración, durante la cual los sujetos pedalearon a una cadencia de entre 30 y 40 rpm, generando una potencia de 20W. Finalizada esta etapa, se les solicitó que mantuvieran en todo momento una cadencia igual o superior a 50 rpm, mientras el software del dispositivo incrementaba la potencia en forma gradual y continua, a razón de 25W por minuto. El test finalizaba cuando el sujeto alcanzaba la fatiga, o era incapaz de sostener la cadencia mínima establecida.

Durante dicho esfuerzo, se realizó en forma continua un análisis directo de gases respiratorios, respiración a respiración, utilizando un ergoespirómetro (Cortex Metalyzer 3B; CORTEX Biophysik GmbH, Leipzig, Alemania). Adicionalmente también se midió la FC, utilizando una banda con sensor (Polar H7; Polar Electro Inc., Finlandia), colocada alrededor del tórax a la altura del proceso xifoideo. Los datos fueron recibidos mediante tecnología bluetooth 4.0, e interpretados por el software correspondiente (MetaSoft Studio). El mismo permitió además la determinación de los umbrales VT1 y VT2.

Durante la realización de las evaluaciones la temperatura fue en todo momento controlada por un sistema de aire acondicionado entre 22 y 24°C (promedio 23,3°C); mientras que la humedad ambiente fue de $53 \pm 6.1\%$.

Evaluaciones de campo

En días posteriores a la evaluación de laboratorio, y dentro del margen de una semana luego de la misma, se realizaron las evaluaciones en un gimnasio de escalada. La misma consistió en la realización continua de una ruta de nivel V1 durante un tiempo de 4 minutos, seguido de una pausa activa autogestionada de baja intensidad de 20 minutos, y posteriormente la realización de otra ruta de 4 minutos, en este caso de nivel V3. Se les solicitó a los participantes un desarrollo continuo de la actividad, evitando detenerse en las presas por más de 3 segundos, ya sea para colocarse magnesio en las manos o para

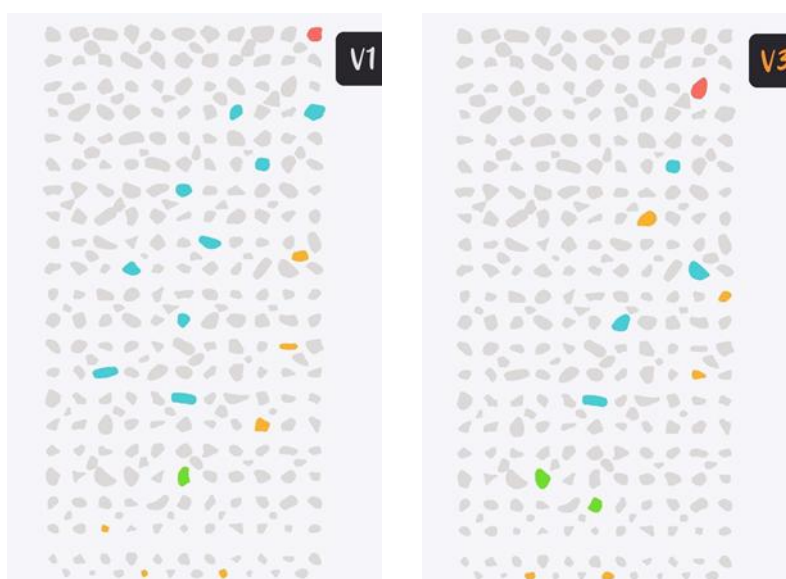
tomar un descanso. Se les pidió además que, durante el tiempo estipulado, escalaran la ruta la mayor cantidad de veces que les fuera posible.

Previo al inicio de la evaluación, cada deportista realizó una entrada en calor de cinco minutos de duración. Considerando que en todos los casos se trataba de deportistas con suficiente experiencia en la modalidad boulder, se permitió que tanto la intensidad como los ejercicios empleados durante la misma fuera definido por cada sujeto. Adicionalmente, inmediatamente previo a la realización tanto de la ruta V1 como de la ruta V3, se solicitó a los deportistas que permanecieran en reposo total durante tres minutos, sentados frente a la pared y visualizando mentalmente la realización del esfuerzo subsiguiente.

En la figura 1 se representan los agarres definidos para el presente estudio en cada una de las modalidades. Las presas verdes corresponden al lugar donde deben colocarse las manos al momento de comenzar; las amarillas sólo pueden ser utilizadas por los miembros inferiores; las azules son libres para cualquier parte del cuerpo; y la roja responde a la presa top (la última del camino, la cual debe recibir el contacto estable de las dos manos).

Figura 1

Representación gráfica de las rutas realizadas por las y los escaladores para ambas modalidades.



En todo momento durante el esfuerzo, los sujetos utilizaron un ergoespirómetro portátil (Metamax 3B-R2) (figura 4), el cual según indicaciones del fabricante fue calibrado previo a cada ejecución. En forma adicional, se utilizó un sensor de FC de banda Polar H7 (Polar Electro Inc., Finlandia), en forma similar a lo realizado en el test de laboratorio.

Además, inmediatamente luego de concluida la realización de cada uno de los bloques de cuatro minutos (V1 y V3), se les preguntó qué tan intenso habían percibido el esfuerzo de toda la ruta, tanto a nivel de disnea como de fatiga muscular, utilizando a este propósito la escala de Borg modificada (con valores de 0 a 10, donde 0 representa *sin esfuerzo percibido*, y 10 *máximo esfuerzo*).

Durante las evaluaciones, la temperatura dentro del gimnasio fue de $26.2 \pm 0.9^{\circ}\text{C}$; mientras que la humedad fue de $52.3 \pm 9.7\%$.

Análisis estadístico

Los resultados para las variables continuas son presentados como media \pm desvío estándar; mientras que para las variables ordinales son presentados como mediana (desvío intercuartil). Para la determinación de las posibles diferencias en los valores de las variables continuas analizadas en los diferentes tipos de esfuerzo (test maximal de laboratorio, escalada nivel V1 y escalada nivel V3) se utilizó el test estadístico ANOVA de medidas repetidas, previa determinación de los supuestos de normalidad (test de Shapiro-Wilk) y esfericidad (test de Mauchly). En caso de no cumplirse con el primero de estos supuestos, se utilizó el test de Friedman para medidas repetidas. En caso de violación del segundo supuesto, se utilizó la corrección de Greenhouse – Geisser. En caso de observar diferencias estadísticamente significativas, se realizó un análisis post-hoc utilizando el test de Bonferroni. Para determinar la posible diferencia en las precepciones de esfuerzo (variable ordinal) entre las rutas de nivel V1 y V3, se utilizó la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon.

En todos los casos se estableció un nivel de significancia de $p < 0.05$. Los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el software libre JASP (versión 0.19.3; Equipo JASP 2024, Universidad de Ámsterdam).

Resultados

De los 22 sujetos inicialmente seleccionados para el estudio, solo 14 fueron finalmente incluidos en el análisis de los datos. La principal causa de exclusión correspondió a la imposibilidad de completar al menos una de las instancias de evaluación programadas, debido a limitaciones de disponibilidad horaria. En la tabla 1 se presentan las características de los sujetos que formaron parte del estudio, en su totalidad y diferenciados por sexo.

Tabla 1

Características de los participantes

	Mujeres (n = 6)	Hombres (n = 8)	Totales de la muestra (n = 14)
Edad (años)	33.8 \pm 5.9	32.0 \pm 6.7	32.8 \pm 6.2
Masa (kg)	58.0 \pm 4.3	75.3 \pm 9.3	67.9 \pm 11.5
Altura (cm)	164.8 \pm 6.5	177.8 \pm 5.1	172.2 \pm 8.6
IMC (kg/m ²)	21.4 \pm 1.9	23.8 \pm 2.6	22.8 \pm 2.6
Masa grasa (%)	17.7 \pm 4.7	12.1 \pm 4.2	14.5 \pm 5.1
Exp. esc. (años)	4.2 \pm 1.2	6.6 \pm 6.8	5.6 \pm 5.2
Frec. ent. (s/s)	2.7 \pm 0.6	3.0 \pm 1.1	2.9 \pm 0.9
VO ₂ máx (ml/kg.min)	42.8 \pm 5.0	47.6 \pm 7.3	45.6 \pm 6.7

Abreviaciones: Exp. esc. = experiencia de escalada; Frec. ent. (s/s) = Frecuencia de Entrenamiento (sesiones por semana)

En la tabla 2 se muestran variables fisiológicas medidas en condiciones de laboratorio mediante un test progresivo en rampa, así como durante el esfuerzo de escalada en las modalidades V1 y V3. Adicionalmente, los resultados de VO₂ pico relativo, FC pico y ventilación pico se muestran en las figuras 2 a 4, respectivamente.

Tabla 2

Variables fisiológicas medidas en laboratorio y en esfuerzo de escalada en las modalidades V1 y V3 (n = 14)

	Laboratorio	V1	V3	Valor p
VO ₂ pico relativo (ml/kg.min)	43.7 ± 6.1	37.6 ± 3.9	39.6 ± 4.8	< 0.001*
FC pico (lpm)	174.7 ± 18.0	167.1 ± 13.3	169.6 ± 10.9	0.2
VMR pico (l/min)	110.6 ± 21.1	76.8 ± 15.0	81.9 ± 21.1	< 0.001*

Nota: los datos de Laboratorio corresponden a un test progresivo en rampa maximal. * indica significancia estadística (p < 0.05). Abreviaciones: FC = Frecuencia cardíaca; VMR = Volumen Minuto Respiratorio

En todas las variables analizadas, los valores registrados en condiciones de laboratorio fueron superiores a los observados durante los esfuerzos de escalada, siendo estos últimos a su vez mayores en la modalidad V3 en comparación con V1. El análisis post-hoc para los valores de VO₂ pico relativos y VMR pico, determinó una diferencia significativa entre el resultado obtenido en el laboratorio y la modalidad V1 (p < 0.001 para ambas variables) y entre el laboratorio y la modalidad V3 (p = 0.015 y p < 0.001 para VO₂ y ventilación respectivamente). Por el contrario, no se observaron diferencias significativas entre los valores de las modalidades V1 y V3 (p = 0.2 y p = 1.0 para VO₂ y ventilación respectivamente). En lo que atañe a la FC pico, las diferencias observadas en ningún caso alcanzaron significancia estadística (p > 0.05); si bien los valores resultaron superiores en el test progresivo maximal en comparación con la modalidad V1 (96% del máximo) y V3 (97% del máximo).

Figura 2

VO₂ pico relativo obtenido mediante un test progresivo en rampa en laboratorio (Lab), y en las modalidades de escalada V1 y V3. Las barras indican un intervalo de confianza del 95%

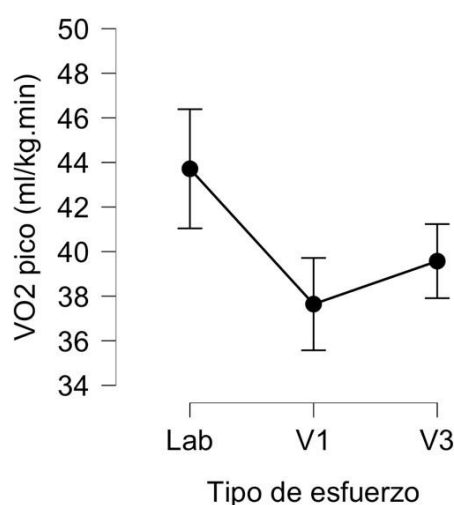
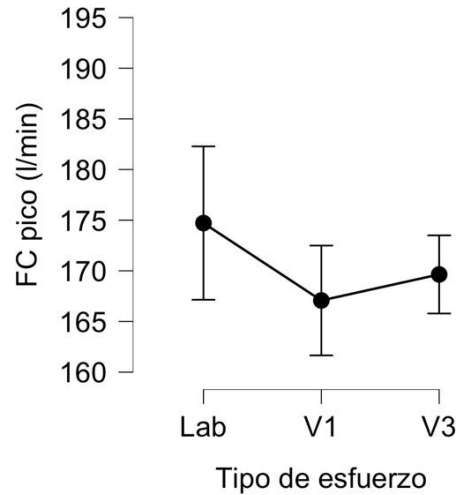
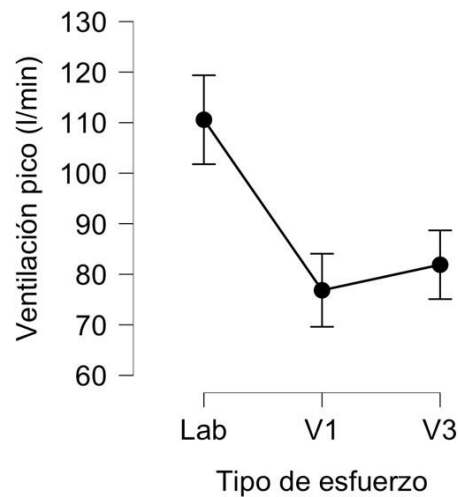


Figura 3

Frecuencia cardíaca pico relativa obtenida mediante un test progresivo en rampa en laboratorio (Lab), y en las modalidades de escalada V1 y V3. Las barras indican un intervalo de confianza del 95%

**Figura 4**

Volumen Minuto Respiratorio pico obtenido mediante un test progresivo en rampa en laboratorio (Lab), y en las modalidades de escalada V1 y V3. Las barras indican un intervalo de confianza del 95%



En la tabla 3 se muestra para ambas modalidades de escalada, el promedio y desvío estándar de las variables VO_2 relativo, FC y VMR, diferenciados para cada uno de los cuatro minutos de esfuerzo (correspondientes a la duración total de cada ruta). En forma adicional, en las figuras 5 y 6 se representan los promedios de VO_2 relativo para cada minuto de escalada, en relación con los umbrales ventilatorios primero (VT1, 27.2 ml/kg.min) y segundo (VT2, 35.7 ml/kg.min) y el VO_2 pico, medidos en el test progresivo en rampa realizado en laboratorio, para V1 y V3 respectivamente.

Tabla 3

Variables fisiológicas diferenciadas para cada minuto de esfuerzo, en ambas modalidades de escalada (n = 14)

<i>Escalada modalidad V1</i>				
	M1	M2	M3	M4
VO ₂ relativo (ml/kg.min)	22.5 ± 2.9	32.5 ± 2.3	34.9 ± 2.7	35.7 ± 3.9
FC (lpm)	146.8 ± 13.0	162.0 ± 12.4	165.5 ± 12,7	166.6 ± 13.3
VMR (l/min)	39.2 ± 7.4	57.0 ± 7.6	66.4 ± 9.9	74.5 ± 13.6
<i>Escalada modalidad V3</i>				
	M1	M2	M3	M4
VO ₂ relativo (ml/kg.min)	22.5 ± 2.8	33.2 ± 3.2	35.8 ± 2.8	38.4 ± 3.6
FC (lpm)	148.2 ± 12.8	163.1 ± 10.5	166.5 ± 11.5	170.3 ± 11.8
VMR (l/min)	40.5 ± 7.8	61.7 ± 12.8	72.4 ± 14.5	81.9 ± 20.3

Abreviaciones: M = minuto; VMR = Volumen Minuto Respiratorio

Figura 5

VO₂ relativo promedio alcanzado en cada minuto de esfuerzo para V1, en relación a los valores promedio de VT1, VT2 y VO₂ pico observados en un test progresivo en rampa en el laboratorio. Abreviaciones: M = minuto; VT = umbrales ventilatorios.

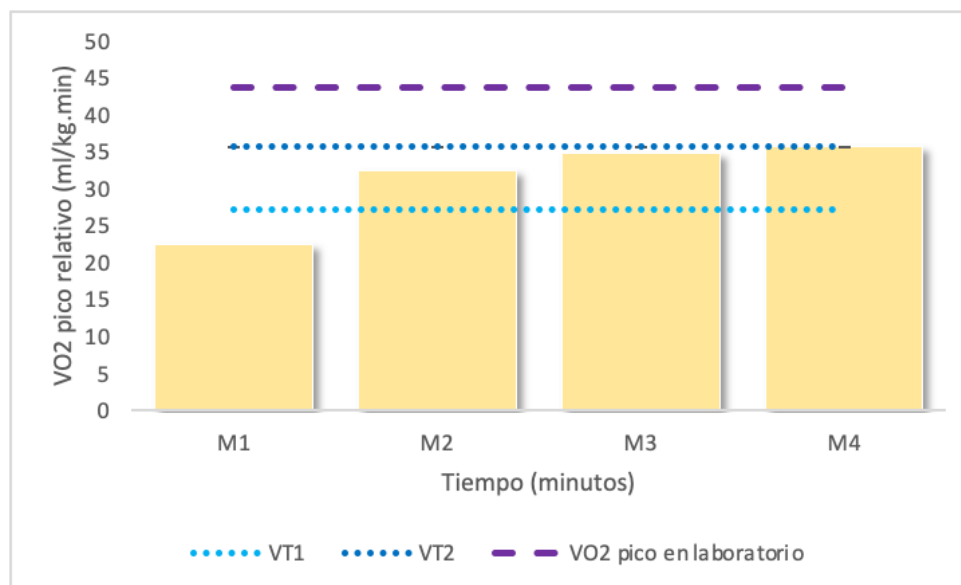
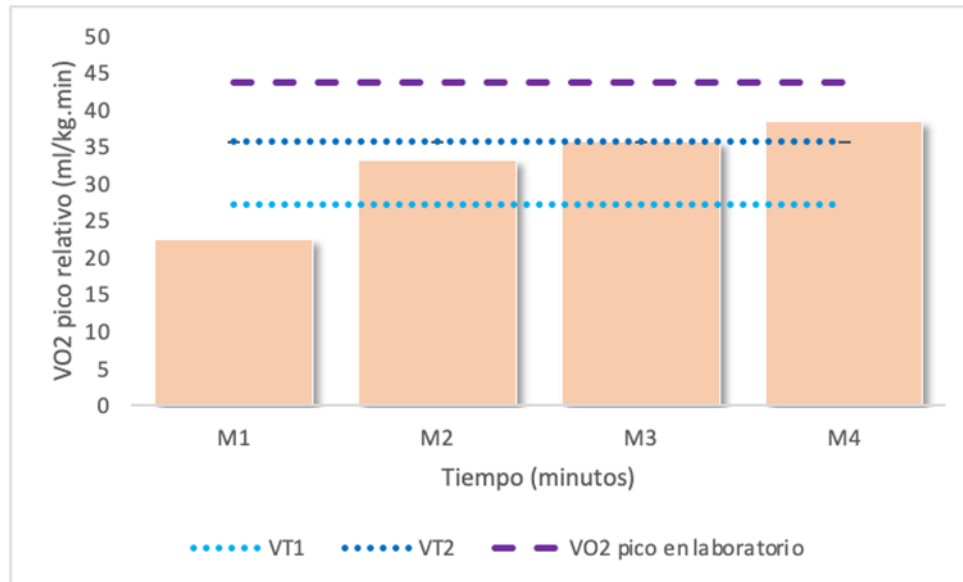


Figura 6

VO₂ relativo promedio alcanzado en cada minuto de esfuerzo para V3, en relación a los valores promedio de VT1, VT2 y VO₂ pico observados en un test progresivo en rampa en el laboratorio. Abreviaciones: M = minuto; VT = umbrales ventilatorios



En ambas modalidades de escalada, y para todas las variables consideradas, se observó un incremento muy notorio de los valores del minuto 1 al minuto 2, y a posteriori un incremento sucesivo menos marcado hasta alcanzar un máximo en el último minuto de esfuerzo.

Particularmente en lo que atañe al VO₂ relativo, en ambas modalidades los valores promedio para el primer minuto se observaron por debajo del umbral VT1 (zona 1 según el modelo trifásico de Skinner y McLellan [1980]). En el caso de la modalidad V1, el valor promedio de los minutos 2 y 3 se encontró en la zona interumbral (zona 2 del modelo); mientras que el valor promedio del minuto 4 coincidió con el umbral VT2, correspondiendo con el 81% del VO₂ pico alcanzado en el laboratorio. En el caso de la modalidad V3, el valor promedio del minuto 2 se observó en la zona interumbral, mientras que el valor promedio del minuto 3 coincidió (prácticamente) con el umbral VT2. Este último fue luego superado en el minuto 4, alcanzando el 88% del VO₂ pico y dentro de la zona 3 del mencionado modelo.

En la tabla 4 se muestran los valores correspondientes a la RPE según escala de Borg modificada, para ambas modalidades y tanto en lo que atañe a disnea como a fatiga muscular global.

Tabla 4

Sensación subjetiva de esfuerzo (RPE) para las modalidades V1 y V3 (n = 14)

Modalidad V1	Modalidad V3	Valor p
--------------	--------------	---------

Disnea	7.0 (3)	7.5 (3.75)	0.3
Fatiga muscular	7.5 (3)	8.0 (2)	0.6

Nota: Los datos son presentados como mediana (desvío intercuartil). Corresponden a la sensación de esfuerzo medida por escala de Borg modificada, para la totalidad de la ruta. La significancia estadística se determinó mediante la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

Para ambas rutas, el valor reportado de fatiga muscular resultó ser ligeramente superior que el reportado para la disnea, aunque con una dispersión grande y sin que la diferencia alcance significancia estadística ($p > 0.05$). Asimismo, la modalidad V3 resultó ser en este sentido más exigente que la modalidad V1, aunque nuevamente las diferencias fueron leves y no significativas ($p > 0.05$).

Discusión

En el presente trabajo se analizaron variables respiratorias y cardiovasculares en escaladores de ambos sexos de la modalidad boulder, comparando los niveles V1 y V3. Hasta donde llega el conocimiento de los autores, este sería el primer estudio con estas características en Uruguay. Adicionalmente, a nivel internacional se han realizado estudios con protocolos similares (de Moraes Bertuzzi et al., 2007; Sheel et al., 2003) pero centrados en la escalada deportiva, existiendo una escasez de datos sobre la modalidad boulder.

Los resultados indican que tanto el VO_2 pico relativo como el VMR pico observados durante la ruta, fueron significativamente menores ($p < 0.05$) que los alcanzados en el test progresivo maximal (81% y 88% del máximo para V1 y V3 respectivamente). En relación a la demanda respiratoria, este hecho refleja la condición submaximal del esfuerzo de escalada en las rutas analizadas. Por el contrario, en lo que atañe a la FC pico, no se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los tres tipos de esfuerzo; siendo los valores alcanzados durante la escalada menores pero muy cercanos ($> 95\%$) del obtenido en condiciones maximales.

Estas observaciones indicarían una pérdida de la linealidad entre FC y VO_2 durante la escalada, con un incremento desproporcionado de la primera en relación al segundo. En este sentido, no se verificaría la linealidad entre ambas variables que sí se observa en test progresivos en cinta ergométrica o cicloergómetro, así como en deportes de resistencia cardiovascular como el ciclismo o la carrera de fondo (López Chicharro et al., 2013).

Esta observación también fue reportada por Mermier et al. (1997) y por Sheel et al. (2003) en escaladores de ambos sexos de competencia experimentados o de nivel elite, así como por de Moraes Bertuzzi et al. (2007) en escaladores de elite y recreacionales, durante la realización de rutas de diferentes grados de dificultad relativa (fácil, moderado o difícil). En estas condiciones se observaron incrementos de la FC hasta un 40% por encima del porcentaje del VO_2 correspondiente.

Dejando de lado el posible estrés psicológico ocasionado el empleo del analizador de gases al cual los y las deportistas no estaban habituados, una posible explicación a este hecho podría estar dada por el miedo a la caída y la ansiedad. Sin embargo, con respecto al primero es de destacar que en la modalidad boulder la altura de la pared es reducida

(15 pies o 4.5m), a lo que se agrega la presencia de una superficie suficientemente acolchonada como para recibir al deportista con mínimo riesgo. En relación a lo segundo, Fryer et al. (2012) observaron que los niveles de ansiedad somática y cognitiva previos al inicio de la ruta no tenían un rol significativo a este respecto, al menos en escaladores con cierto grado de experiencia como es el caso del presente trabajo. Esto podría explicarse por la capacidad de los escaladores experimentados para diferenciar el riesgo percibido del riesgo real.

Otra posible causa para la pérdida de relación FC / VO_2 podría estar relacionada con el uso durante la escalada de contracciones isométricas intermitentes, particularmente a nivel de los miembros superiores, limitando el flujo sanguíneo de los músculos activos. Dichas contracciones están determinadas fundamentalmente por agarres realizados en un nivel superior al del plano del corazón, lo que suscita un incremento en la actividad nerviosa simpática muscular, mediada por vía metaborefleja; concomitantemente determinando un incremento en la FC (Michikami et al., 2002). Adicionalmente, durante el presente estudio los descansos durante el esfuerzo fueron limitados, no dando tiempo para que los escaladores pudieran sacudir y relajar sus manos y miembros superiores; lo que eventualmente podría haber reducido el incremento desproporcionado de la FC (Fryer et al., 2012).

La modalidad boulder, en comparación con otras modalidades como la escalada de dificultad o *lead*, requiere esfuerzos de menor duración, pero mayor esfuerzo muscular localizado, a lo que se agrega una participación considerable del metabolismo no dependiente de oxígeno en conjunción con las fuentes aeróbicas de obtención de energía metabólica (Callender et al., 2021). En concordancia con esto, en un estudio con escaladores recreacionales y de elite, realizado en pared de 10m de altura y con rutas de nivel fácil, moderado y difícil (de 25 movimientos en promedio), se determinó que para ambos grupos y para las tres rutas utilizadas el metabolismo energético preponderante era el aeróbico u oxidativo, seguido por una muy importante contribución del metabolismo aláctico no dependiente de oxígeno o de los fosfágenos, y una menor contribución del metabolismo láctico no dependiente de oxígeno o glucolítico. En todos los casos, se determinó que la producción de ATP considerando el aporte acumulado de las vías no dependientes de oxígeno (lácticas y alácticas) fue superior a la de las vías aeróbicas (de Moraes Bertuzzi et al., 2007). Todo esto contribuiría a un incremento desproporcionado de la FC, así como de la presión arterial (Callender et al., 2021).

Este hecho, aunado a que los resultados indican que los deportistas no alcanzaron un estado estable durante el tiempo que demandó el esfuerzo, llevan a proponer que la FC no constituiría la mejor herramienta para estimar la intensidad de la carga aeróbica en este tipo de trabajos. Esto fue también sugerido por Mermier et al. (1997), quienes indicaron que la relación FC / VO_2 que se verifica en esfuerzos de tipo aeróbico no debería ser utilizada en el análisis de la escalada, o para la prescripción de intensidad de la carga de entrenamiento para este deporte. En este sentido, otras herramientas como la RPE o la monitorización de la saturación de O_2 muscular utilizando sensores portátiles, podrían representar una mejor opción.

La importante contribución de las contracciones de predominio isométricas, particularmente a nivel de los músculos flexores de los dedos, así como de la cintura escapular, ha llevado a categorizar a esta modalidad de escalada como un deporte de fuerza más que de resistencia cardiovascular y respiratoria (Kuepper et al., 2009). En relación a esto, se ha sugerido que los escaladores recreacionales no requieren un nivel elevado de capacidad aeróbica relativa (Watts et al., 2000). En concordancia, los escaladores y escaladoras del presente estudio presentaron niveles de $\text{VO}_{2\text{máx}}$ ligeramente superiores a los estimados para adultos saludables inactivos (mujeres: 38.6

ml/kg.min vs 42.8 ml/kg.min; varones: 47.2 ml/kg.min vs 47.6 ml/kg.min; hipocinéticos y escaladores respectivamente) (Barrios Vergara et al., 2018); pero inferiores a los observados en deportistas adultos de resistencia en pruebas maximales en cicloergómetro (mujeres: 49.1 ml/kg.min vs 42.8 ml/kg.min; varones: 51.9 ml/kg.min vs 47.6 ml/kg.min; deportistas de resistencia y escaladores respectivamente) (Wiecha et al., 2023).

Incluso se ha determinado que escaladores de nivel elite presentan VO_2 máximo promedio de entre 52 y 55 ml/kg.min (Watts, 2004), similar al observado en gimnastas (España-Romero et al., 2009) pero que resulta notoriamente inferior a lo reportado para deportistas de resistencia como ciclistas de elite (>68 ml/kg.min) (Kuepper et al., 2009). Es de mencionar que dichos valores se obtuvieron en test progresivos realizados en cinta ergométrica o cicloergómetro, lo que implica esfuerzos a los cuales los escaladores podrían no haber estado habituados; algo que debe ser tenido en cuenta al momento de interpretar los resultados.

Considerando la mencionada demanda de esfuerzo muscular, sería previsible que la fatiga localizada en los músculos flexores del antebrazo constituya un determinante más importante en el rendimiento que la fatiga sistémica (predominantemente de naturaleza aeróbica), como se sugirió en estudios previos (Schöffl et al., 2004, 2006; Sheel, 2004). En concordancia con esto, en el presente trabajo la RPE muscular para el total de la ruta resultó superior, para ambos niveles, a la RPE aeróbica (en términos de disnea). Sin embargo, es de destacar que las diferencias en los promedios fueron mínimas (0.5 puntos en ambos casos) y no significativas ($p > 0.05$). Esto indicaría que, en lo que atañe al rendimiento en esfuerzos similares a los del presente trabajo, el entrenamiento de la resistencia muscular (particularmente de la logia anterior del antebrazo y de los músculos de la cintura escapular) resultaría de similar relevancia que la mejora de la resistencia aeróbica. Sin embargo, el hecho de que los sujetos no tuvieran experiencia previa con el uso de la escala de Borg modificada, u otras similares, implica que estos resultados deban ser considerados con cautela.

En relación a la diferencia observada entre los niveles de escalada V1 y V3, como era de esperar se obtuvieron valores mayores para todas las variables analizadas (VO_2 pico, FC pico y VMR pico) en el segundo con respecto al primero. No obstante, las diferencias no alcanzaron significancia estadística, lo que lleva a sugerir que la demanda fisiológica no difiere en forma importante entre ambas rutas estudiadas. En contraposición, Mermier et al. (1997) estudiando escaladores experimentados de ambos sexos hallaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en la FC, concentración de lactato sanguíneo, VO_2 y gasto calórico al comparar entre diferentes niveles de dificultad de escalada. Sin embargo, y a diferencia del presente estudio, en dicho trabajo se utilizaron paredes con diferentes grados de inclinación para incrementar la dificultad (90, 106 y 151 grados), lo que podría explicar las mencionadas diferencias.

En lo que atañe a las demandas fisiológicas observadas en el presente trabajo diferenciadas por minuto de esfuerzo, si bien sus valores se incrementaron sucesivamente desde el primer hasta el último minuto de la ruta, sus valores fueron notoriamente menores en el primer minuto con respecto a los tres restantes, y sin llegar a alcanzar un estado estable claro al completar el esfuerzo. Considerando el modelo trifásico de la cinética del VO_2 , los hallazgos indicarían que durante el primer minuto los sujetos se encontraban predominantemente en la fase I o componente cardiodinámico, representado por bajos niveles relativos de VO_2 . Adicionalmente, en los tres minutos finales los hallazgos indicarían que los escaladores y escaladoras se encontraban en la fase II o componente primario de dicho modelo, observándose un aumento lento pero continuo en el VO_2 (componente lento de la cinética del VO_2), sin llegar a alcanzar la fase

III o estado estable (Harvey, 2011). Esta dinámica resulta esperable, ya que durante la mayor parte del esfuerzo los deportistas se hallaban en intensidades por encima del VT1, y cercanas (o incluso superando) el VT2. A estas intensidades de esfuerzo, cuatro minutos podrían no resultar suficientes para alcanzar la mencionada estabilidad fisiológica.

Adicionalmente, el hecho de que los y las deportistas alcanzaran intensidades cercanas al VT2 durante un porcentaje significativo del tiempo total de esfuerzo, daría cuenta de una importante contribución del sistema glucolítico durante la ruta. Esto está en concordancia con lo reportado por Callender et al. (2021), quienes indican que el boulder de competencia demanda un esfuerzo cardiorrespiratorio importante, evidenciado por porcentajes elevados del $\text{VO}_{2\text{máx}}$ y un prolongado tiempo de esfuerzo por encima del VT1. Adicionalmente, de Moraes Bertuzzi et al. (2007) encontraron valores pico de lactato en sangre capilar cercanos a 4.0 mMol/L en escaladores recreacionales (4.4 ± 1.6 mMol/L) y de elite (3.9 ± 1.8 mMol/L) para una ruta de dificultad fácil y difícil, respectivamente. Si bien la relación entre la lactatemia y el VT2 puede variar en forma significativa entre sujetos, se ha establecido que en este último umbral la concentración de lactato en sangre es de aproximadamente 4.0 mMol/L (Faude et al., 2009). En este sentido los deportistas se encontrarían cercanos a su VT2, correspondiéndose esto con los hallazgos del presente estudio.

Dichos resultados indicarían que, durante las rutas estudiadas, tanto en lo que atañe al nivel V1 como V3 la obtención de energía metabólica depende en gran medida del sistema glucolítico. Si bien es necesario ser cautelosos con la interpretación de estos resultados ya que la determinación de los umbrales es dependiente del protocolo utilizado, estos hallazgos podrían representar un aporte al momento de planificar la preparación física de los escaladores y escaladoras.

El presente estudio tuvo limitaciones, destacándose entre ellas haber contado con una muestra de tamaño relativamente reducido. No obstante, se debe considerar que investigaciones previas similares han utilizado muestras de tamaño comparable. Adicionalmente, hubiera sido deseable contar con deportistas con experiencia en realización de test que involucren el empleo de analizadores de gases, así como en la utilización de escalas de sensación subjetiva de esfuerzo. Además, es necesario mencionar que dos de los escaladores participaron del estudio luego de entre cuatro y seis semanas de inactividad deportiva, siendo esto en todos los casos no ocasionado por lesiones deportivas. Por último, en relación al empleo de ergoespirómetros portátiles, se ha sugerido que el movimiento excesivo y la hiperventilación asociados al esfuerzo podrían afectar el registro del equipo (McArdle et al., 2015). De todas formas, consideramos que el tipo de esfuerzos analizados en el presente trabajo no determinaron una pérdida en la exactitud de las mediciones registradas.

Conclusiones

En el presente trabajo se estudiaron las respuestas fisiológicas agudas, en particular aquellas vinculadas a la contribución del metabolismo aeróbico, durante la realización de dos rutas de diferente dificultad en la escalada boulder. Se observó una marcada disociación entre la FC y el VO_2 , posiblemente relacionada con el predominio de contracciones isométricas intermitentes en los miembros superiores. Estos resultados refuerzan la idea de que, en esta disciplina, la FC por sí sola no constituye un indicador fiable de la carga de esfuerzo, siendo recomendable complementar su monitoreo con otras herramientas.

Asimismo, se destaca una contribución significativa del metabolismo glucolítico no dependiente de O₂ en la producción de energía, incluso en rutas de baja o moderada dificultad. Esto subraya la necesidad de incluir estrategias de entrenamiento orientadas al desarrollo y optimización de esta vía energética, en procura del óptimo rendimiento.

Considerando el crecimiento en los últimos años de la popularidad de la escalada deportiva, tanto a nivel global como en Uruguay, creemos necesaria la realización de más estudios de carácter científico en esta área. En este sentido, sería recomendable la realización de trabajos similares en boulder y otras modalidades, con una mayor cantidad de sujetos, que impliquen la realización de test progresivos maximales adaptados a la realidad técnica de este deporte, y que incorporen el análisis de variables fisiológicas complementarias, como la lactatemia y en particular la espectroscopía funcional del infrarrojo cercano (NIRS) para la monitorización del nivel de O₂ muscular.

Esta tecnología no invasiva permitiría obtener información más precisa sobre la dinámica de oxigenación local, especialmente en los músculos flexores de los dedos, altamente exigidos durante el esfuerzo. Su aplicación podría contribuir a una mejor comprensión de los mecanismos fisiológicos involucrados en el rendimiento y la fatiga en escaladores de distintos niveles, así como constituir una herramienta útil para la programación y control de la intensidad del entrenamiento.

Agradecimientos

Manifestamos nuestro agradecimiento a todos los escaladores y escaladoras que participaron del presente estudio. Sin todo el tiempo y esfuerzo que nos dedicaron, nada de esto hubiera sido posible.

Agradecemos especialmente a la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República (Udelar) por el apoyo financiero otorgado en el marco del Programa de Grupos I+D, en cuyo contexto se llevó a cabo el presente trabajo.

Referencias

Asociación Uruguaya de Escalada. (2025). Dónde escalar en Uruguay. <https://aude.com.uy/>

Barrios Vergara, M., Ocaranza Ozimica, J., Llach Fernandez, L., Osorio Fuentealba, C., Giner Costagliola, V., y Sacomori, C. (2018). VO₂ Indirect Maximum and Fitness Age of Sedentary and Non-Sedentary. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*, 18(71), 493-505. <https://doi.org/10.15366/rimcafd2018.71.006>

Callender, N., Hayes, T., y Tiller, N. (2021). Cardiorespiratory demands of competitive rock climbing. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 46, 161-168. <https://doi.org/10.1139/apnm-2020-0566>

de Moraes Bertuzzi, R. C., Franchini, E., Kokubun, E., y Kiss, M. A. (2007). Energy system contributions in indoor rock climbing. *European Journal of Applied Physiology*, 101(3), 293-300. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0501-0>

España-Romero, V., Artero, E.G., Ortega, F.B., Jiménez-Pavón, D., Gutiérrez, A., Castilllo, M.J., y Ruiz, J.R. (2009). Aspectos fisiológicos de la escalada deportiva. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*, 9(35), 264-298.

Faude, O., Kindermann, W., y Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts: how valid are they? *Sports Medicine*, 39(6), 469–490. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939060-00003>

Fryer, S., Dickson, T., Draper, N., Eltom, M., Stoner, L., y Blackwell, G. (2012). The effect of technique and ability on the VO₂–heart rate relationship in rock climbing. *Sports Technology*, 5(3-4), 143-150. <https://doi.org/10.1080/19346182.2012.755538>

Gómez, C. G., Rodríguez, D. A. S., Carvalho, W. R. G., Mostarda, C.T., Gambassi, B. B., Rodrigues, B., Silva, F.F., Higino, W. P., y Souza, R. A. (2017). La Práctica de la Escalada Deportiva Contribuye al Mejoramiento de la Modulación Autónoma en Individuos Jóvenes. *Journal of Exercise Physiology online*, 20(2), 84-91.

Harvey, J. (2011). A Review: Analyzing How VO₂ Kinetics Limit Exercise Performance. *Journal of Exercise Physiology online*, 14(3), 67-73.

International Federation of Sport Climbing. (2020). IFSC Releases Its 2019 Annual Report. <https://climbingbusinessjournal.com/ifsc-releases-its-2019-annual-report/>

Kuepper, T., Morrison, A., Gieseler, U., y Schoeffl, V. (2009). Sport climbing with pre-existing cardio-pulmonary medical conditions. *International Journal of Sports Medicine*, 30(06), 395-402. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1112143>

López Chicharro, J., Vicente Campos, D., y Cancino, J. (2013). *Fisiología del Entrenamiento Aeróbico. Una Visión Integrada*. Editorial Médica Panamericana

McArdle, W. D., Katch, F. I., y Katch, V. L. (2015). *Fisiología del ejercicio: Nutrición, rendimiento y salud*. (8ª ed.). Wolters Kluwer Health España.

Mermier, C. M., Robergs, R. A., McMinn, S. M., y Heyward, V. H. (1997). Energy expenditure and physiological responses during indoor rock climbing. *British Journal of Sports Medicine*, 31(3), 224-228. <https://doi.org/10.1136/bjsm.31.3.224>

Michikami, D., Kamiya, A., Fu, Q., Niimi, Y., Iwase, S., Mano, T., y Suzumura, A. (2002). Forearm elevation augments sympathetic activation during handgrip exercise in humans. *Clinical Science*, 103, 295 – 301. <https://doi.org/10.1042/cs1030295>

Schöffl, V., Klee, S., y Strecker, W. (2004). Evaluation of physiological standard pressures of the forearm flexor muscles during sport specific ergometry in sport climbers. *British Journal of Sports Medicine*, 38, 422–425. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2002.003996>

Schöffl, V., Möckel, F., Köstermeyer, G., Roloff, I., y Küpper, T. (2006). Development of a performance diagnosis of the anaerobic strength endurance of the forearm flexor muscles in sport climbing. *International Journal of Sports Medicine*, 27, 205–211. <http://doi.org/10.1055/s-2005-837622>

Sheel, A. W. (2004). Physiology of sport rock climbing. *British Journal of Sports Medicine*, 38, 355–359. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2003.008169>

Sheel, A. W., Seddon, N., Knight, A., McKenzie, D. C., y Warburton, D. E. R. (2003). Physiological Responses to Indoor Rock-Climbing and Their Relationship to Maximal Cycle Ergometry. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(7), 1225-1231. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000074443.17247.05>

Skinner, J. S., y McLellan, T. H. (1980). The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 51(1), 234–248. <https://doi.org/10.1080/02701367.1980.10609285>

Watts, P. B. (2004). Physiology of difficult rock climbing. *European Journal of Applied Physiology*, 91, 361-372. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-1036-7>

Watts, P. B., Daggett, M., Gallagher, P., y Wilkins, B. (2000). Metabolic Response During Sport Rock Climbing and the Effects of Active Versus Passive Recovery. *International Journal of Sports Medicine*, 21, 185-90. <https://doi.org/10.1055/s-2000-302>

Wiecha, S., Kasiak, P. S., Cieśliński, I., Takken, T., Palka, T., Knechtle, B., Nicolaidis, P. T., Małek, L. A., Postuła, M., Mamcarz, A., y Śliż, D. (2023). External validation of VO₂max

prediction models based on recreational and elite endurance athletes. PLoS One, 18(1), e0280897. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280897>