

Selected Papers from Impact

Relación entre el Rendimiento Incremental Máximo y el Ejercicio de Intervalos de Alta Intensidad en Atletas de Élite

Relationship Between Maximal Incremental and High-Intensity Interval Exercise Performance in Elite Athletes

Shih-Chieh Chang¹, Alessandra Adami², Hsin-Chin Lin¹, Yin-Chou Lin^{1,3}, Carl P. C. Chen^{1,3,4}, Tieh-Cheng Fu^{4,5}, Chih-Chin Hsu^{4,5} y Shu-Chun Huang^{1,4,6,7}

¹Department of Physical Medicine & Rehabilitation, Chang Gung Memorial Hospital, Linkou, Taiwan

²Department of Kinesiology, University of Rhode Island, Kingston, RI, United States of America

³Department of Physical Medicine & Rehabilitation, Chang Gung Memorial Hospital, Taoyuan branch, Taiwan

⁴College of Medicine, Chang Gung University, Kwei-Shan, Tao-Yuan County, Taiwan

⁵Department of Physical Medicine and Rehabilitation, Chang Gung Memorial Hospital, Keelung, Taiwan

⁶Healthy Aging Research Center, Chang Gung University, Taoyuan City, Taiwan, ⁷Department of Physical

⁷Medicine and Rehabilitation, New Taipei Municipal Tucheng Hospital, Chang Gung Memorial Hospital, New Taipei, Taiwan

RESUMEN

Este estudio descriptivo tuvo como objetivo explorar los factores fisiológicos que determinan la tolerancia al esfuerzo durante el ejercicio de intervalos de alta intensidad. Cuarenta y siete mujeres jóvenes (15-28 años) se inscribieron: 23 atletas de equipos de reserva nacional de Taiwán y 24 mujeres moderadamente activas. Cada participante se sometió a una prueba de ejercicio cardiopulmonar incremental máxima INC (protocolo de Bruce modificado) en el primer día y una prueba de intervalos de alta intensidad (HIIT) en el segundo día, ambas pruebas realizadas en una cinta de correr. El protocolo de HIIT implicó la alternancia entre esfuerzos de 1 minuto al 120% de la velocidad máxima, en la misma pendiente alcanzada al final del test INC, y un descanso de 1 minuto hasta el agotamiento voluntario. El intercambio de gases, la frecuencia cardíaca (FC) y la oxigenación muscular en el vasto lateral derecho, fueron medidos por espectroscopía de infrarrojo cercano. El número de repeticiones completadas (Rlim) por cada participante se consideró como el índice de tolerancia HIIT. Los resultados mostraron una gran diferencia en el Rlim (rango, 2.6-12.0 repeticiones) entre las participantes. La regresión lineal paso a paso reveló que la variación en el Rlim dentro de la cohorte estaba relacionada con las tasas de recuperación del consumo de oxígeno (VO₂), la FC en el segundo minuto después del INC y el índice de saturación del tejido muscular al agotamiento ($R = 0.644$). Además, la edad se correlacionó linealmente con el Rlim (R ajustado = -0.518 , $p < 0.0001$). En conclusión, las tasas de recuperación de VO₂ y FC después de la prueba incremental, y el índice de saturación muscular al agotamiento, fueron los principales factores fisiológicos relacionados con el rendimiento de HIIT. Estos hallazgos proporcionan información sobre el papel de la fase de recuperación después de las pruebas de ejercicio INC máximas. Se justifica una investigación futura que investigue una combinación de pruebas INC y HIIT para determinar la mejora del rendimiento inducida por el entrenamiento.

Palabras Clave: Rendimiento incremental, Intervalos alta intensidad, Élite

ABSTRACT

This descriptive study aimed to explore the physiological factors that determine tolerance to exertion during high-intensity interval effort. Forty-seven young women (15–28 years old) were enrolled: 23 athletes from Taiwan national or national reserve teams and 24 moderately active females. Each participant underwent a maximal incremental INC (modified Bruce protocol) cardiopulmonary exercise test on the first day and high-intensity interval testing (HIIT) on the second day, both performed on a treadmill. The HIIT protocol involved alternation between 1-min effort at 120% of the maximal speed, at the same slope reached at the end of the INC, and 1-min rest until volitional exhaustion. Gas exchange, heart rate (HR), and muscle oxygenation at the right vastus lateralis, measured by near-infrared spectroscopy, were continuously recorded. The number of repetitions completed (Rlim) by each participant was considered the HIIT tolerance index. The results showed a large difference in the Rlim (range, 2.6–12.0 repetitions) among the participants. Stepwise linear regression revealed that the variance in the Rlim within the cohort was related to the recovery rates of oxygen consumption (VO₂), HR at the second minute after INC, and muscle tissue saturation index at exhaustion ($R = 0.644$). In addition, age was linearly correlated with Rlim (adjusted $R = -0.518$, $p < 0.0001$). In conclusion, the recovery rates for VO₂ and HR after the incremental test, and muscle saturation index at exhaustion, were the major physiological factors related to HIIT performance. These findings provide insights into the role of the recovery phase after maximal INC exercise testing. Future research investigating a combination of INC and HIIT testing to determine training-induced performance improvement is warranted.

Keywords: Incremental performance, High intensity intervals, Elite

Abreviaciones: Ath, atletas; ATT, grosor de tejido adiposo; BCM, masa de células corporales; EqCO₂, equivalente ventilatorio para CO₂; EqO₂, equivalente ventilatorio para O₂; FFM, masa libre de grasa; HHb, desoxi-(hemoglobina+mioglobina); HR, frecuencia cardíaca; HRmax, frecuencia cardíaca máxima; HR reserva, frecuencia cardíaca de reserva; $\Delta HR0.5$, HRmax – HR en 0.5 min de recuperación; $\Delta HR1$, HRmax – HR a 1 min de recuperación; $\Delta HR2$, HRmax – HR en 2 min de recuperación; $\Delta HR0.5/$, $\Delta HR0.5/HRmax$; $\Delta HR1/$, $\Delta HR1/HRmax$; $\Delta HR2/$, $\Delta HR2/HRmax$; HRrt1/2, lapso de tiempo en el que la frecuencia cardíaca se recupera a la mitad; HIIT, test de intervalos de alta intensidad; INC, test de ejercicio incremental máximo; MA, participantes moderadamente activas; Max O₂ pulso, máximo VO₂/HR; NIRS, espectroscopía de infrarrojo cercano; O₂Hb, oxi-(hemoglobina+mioglobina); $\Delta O_2Hb0.5$, O₂Hb en 0.5 min durante la recuperación – peak O₂Hb; ΔO_2Hb1 , O₂Hb a 1 min durante la recuperación – peak O₂Hb; ΔO_2Hb2 , O₂Hb en 2 min durante la recuperación – peak O₂Hb; $\Delta O_2Hb0.5/$, $\Delta O_2Hb0.5/(\text{maximal O}_2\text{Hb} - \text{minimal O}_2\text{Hb})$ durante la recuperación; $\Delta O_2Hb1 /$, $\Delta O_2Hb1/(\text{maximal O}_2\text{Hb} - \text{minimal O}_2\text{Hb})$ durante la recuperación; $\Delta O_2Hb2/$, $\Delta O_2Hb2/(\text{maximal O}_2\text{Hb} - \text{minimal O}_2\text{Hb})$ durante la recuperación; PBF, % de grasa corporal; PCr, fosfocreatina; Rlim, número de repeticiones totales hasta el límite (es decir, agotamiento) en el test de intervalos de alta intensidad; SLM, masa magra suave; SMM, masa músculo esquelético; SMLA, masa muscular por segmento, brazo izquierdo; SMLL, masa muscular por segmento, pierna izquierda; SMRA, masa muscular por segmento, brazo derecho; SMRL, masa muscular por segmento, pierna derecha; SMTR, masa muscular por segmento, tronco; TBM/FFM, masa corporal total/masa libre de grasas; T1/2, lapso de tiempo de cambios de la variable a la mitad; THb, total-(hemoglobina+mioglobina); TSI, índice de saturación de tejido; TSIINC, índice de saturación del tejido al agotamiento (inmediatamente antes de la recuperación) durante INC; $\Delta TSI0.5$, TSI en 0.5 min durante la recuperación de INC – pico TSI; $\Delta TSI1$, TSI en 1 min durante la recuperación de INC – pico TSI; $\Delta TSI2$, TSI en 2 min durante la recuperación de INC – pico TSI; $\Delta TSI0.5/$, $\Delta TSI0.5/(\text{máxima TSI} - \text{mínimo TSI})$ durante la recuperación; $\Delta TSI1 /$, $\Delta TSI1/(\text{máxima TSI} - \text{mínima TSI})$ durante la recuperación; $\Delta TSI2/$, $\Delta TSI2/(\text{máxima TSI} - \text{mínima TSI})$ durante la recuperación; VCO₂, tasa de producción de dióxido de carbono; VE, minuto ventilación; VO₂, tasa de consumo de oxígeno; VO₂máx, máxima VO₂; $\Delta VO_20.5$, VO₂máx – VO₂ en 0.5 min de recuperación; ΔVO_21 , VO₂máx – VO₂ en 1 min recuperación; ΔVO_22 , VO₂máx – VO₂ en 2 min de recuperación; $\Delta VO_20.5/$, $\Delta VO_20.5/\text{máximo VO}_2$; $\Delta VO_21/$, $\Delta VO_21/\text{máximo VO}_2$; $\Delta VO_22/$, $\Delta VO_22/\text{máximo VO}_2$; /máximo VO₂rt1/2, lapso de tiempo en el que el VO₂ se recupera a la mitad.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las pruebas de ejercicio incremental (INC) se utilizan ampliamente para evaluar el fitness cardiopulmonar entre distintas poblaciones, desde atletas de élite y jugadores semiprofesionales hasta pacientes con enfermedades crónicas cardiovasculares y pulmonares [1–4]. El INC se usa para cuantificar el rendimiento total de todo el cuerpo, y para los atletas, se ha convertido en la evaluación estándar de oro para identificar las zonas de intensidad de ejercicio sobre las cuales se diseñan los programas de entrenamiento deportivo. Puesto que Taylor y cols. [5] mostraron que la respuesta a las

pruebas INC está fuertemente correlacionada con el tipo de protocolo seguido y las características individuales de la persona que se somete a la prueba, se ha prestado mucha atención al diseño de las pruebas INC estandarizadas óptimas que tengan en cuenta las habilidades físicas y los objetivos de las pruebas (por ejemplo, determinación de umbrales ventilatorios, consumo máximo de oxígeno (VO₂máx), etc.) [4]. En este contexto, Muscat y cols. [6] recomendaron el uso de un aumento en la tasa de trabajo para obtener una evaluación confiable de la aptitud específica del modo para determinar los protocolos de entrenamiento más favorables.

En muchos juegos de pelota competitivos, incluidos el fútbol y el baloncesto, y juegos como el bádminton, una tarea típica específica del modo de ejercicio está representada por la combinación de esfuerzos repetidos y fases de recuperación, que replican estrechamente el rendimiento real del partido de campo. A altos niveles profesionales, la intensidad de este rendimiento se puede comparar con los entrenamientos de intervalos de alta intensidad. El entrenamiento en intervalos de alta intensidad (HIIT), una metodología de entrenamiento muy popular, puede describirse como un método de entrenamiento que alterna entre esfuerzos de alta intensidad de corta duración y períodos de recuperación pasivos o activos. Independientemente del formato del protocolo de entrenamiento (es decir, intensidad, duración, número de turnos y series), el HIIT tiene varias ventajas prácticas que lo hacen atractivo para los jugadores de deportes de pelota, como la posibilidad de mejorar rápidamente (por ejemplo, acortar el período de preparación) y mantener una condición física óptima durante un período de tiempo más largo debido a una capacidad de recuperación más rápida [7]. Los objetivos principales para usar HIIT como método de entrenamiento preferido para jugadores profesionales son mejorar rápidamente la capacidad aeróbica de todo el cuerpo; para reducir el retraso entre las solicitudes mecánicas (es decir, tareas de ejercicio) y la respuesta metabólica muscular; acortar el tiempo de recuperación entre esfuerzos repetidos, rounds y partidos; y para reducir la aparición de fatiga. Estas mejoras del rendimiento están relacionadas con una serie de adaptaciones aeróbicas y anaeróbicas inducidas por el HIIT, como un aumento en las dimensiones de las mitocondrias del músculo esquelético, mayor tolerancia al pH sanguíneo y mayores capacidades anaeróbicas [7-12], entre otros.

A pesar de que el HIIT se ha utilizado ampliamente en la práctica, rara vez se utiliza como protocolo de testeo [13,14], y se utiliza el INC para planificar el calendario de entrenamiento. Muy pocos estudios con grupos pequeños de jugadores de fútbol han utilizado pruebas de carrera intermitente (por ejemplo, la prueba YO-YO de recuperación intermitente) para determinar cambios en el rendimiento después de que los jugadores sigan con el entrenamiento HIIT [15-18]. Hasta la fecha, ninguno ha considerado la relación entre los protocolos INC y HIIT al evaluar el desempeño de jugadores profesionales de equipo.

En 2015-2016, un grupo de atletas de reserva de los equipos nacionales de fútbol, baloncesto y bádminton de Taiwán visitaron nuestro laboratorio en el Hospital Chang Gung Memorial para una serie de evaluaciones de rendimiento de rutina. Durante ese tiempo, administramos un protocolo INC tradicional y HIIT. Establecimos la intensidad del ejercicio HIIT al 120% de la velocidad más alta alcanzada durante el INC, y consideramos el número de repeticiones realizadas (Rlim) como el índice de tolerancia para cada participante. El objetivo principal de este estudio descriptivo fue determinar qué factores están fuertemente asociados con las limitaciones en el HIIT. Presumimos que el Rlim en el HIIT varía mucho entre los individuos a pesar de la misma intensidad relativa y duración y patrón de recuperación del ejercicio, lo que sugerimos se debe principalmente a las capacidades de recuperación individual.

MATERIALES Y MÉTODOS

Participantes

Todos los participantes dieron su consentimiento informado por escrito después de recibir explicaciones orales y escritas de los procedimientos experimentales y los riesgos asociados. Esta investigación se realizó de acuerdo con los estándares éticos de la Declaración de Helsinki. Este estudio incluyó a 47 atletas y participantes femeninas moderadamente activas (MA). Las atletas eran las reservas de los equipos nacionales de fútbol, baloncesto y bádminton de Taiwán. Las participantes asignadas al grupo de MA fueron mujeres jóvenes que participaron en ejercicios de intensidad moderada durante al menos 60 minutos a la semana [19]. El protocolo del experimento fue aprobado por la Junta de Revisión Institucional del Hospital Chang Gung Memorial.

Protocolo

Las participantes visitaron nuestro laboratorio en el Hospital Chang Gung Memorial dos veces para realizar una prueba máxima INC y de HIIT. Cada participante recibió instrucciones de abstenerse de hacer ejercicio vigoroso o de tomar cafeína durante 24 hs antes de la prueba y de dormir al menos 8 hs la noche anterior a los tests. Todas las evaluaciones tuvieron lugar aproximadamente a la misma hora del día en condiciones ambientales controladas (24°C, 63% de humedad).

Evaluaciones antropométricas y de la composición corporal.

Al comienzo de la visita, se registraron características antropométricas básicas (altura y peso). Posteriormente, las composiciones de cuerpo completo se determinaron utilizando el analizador InBody s10 (Seúl, Corea) y midiendo la resistencia eléctrica a cuatro frecuencias diferentes (5, 50, 250 y 500 kHz) [20–22]. Cada participante se tumbó en una mesa acolchada durante toda la duración de la prueba y los sensores para medir la resistencia eléctrica se colocaron al nivel de cada segmento del cuerpo según las instrucciones del fabricante. Las participantes recibieron instrucciones de ayunar durante 2 hs antes de la prueba, que duró 20 minutos.

Testeo cardiopulmonar.

Durante la primera visita, se realizó la prueba INC máxima. La prueba comenzó con 1 minuto de caminata a una velocidad de 1 milla/h, seguido de un protocolo de Bruce incremental modificado realizado hasta el agotamiento voluntario (es decir, el sujeto no podía mantener la velocidad de la cinta a pesar de un fuerte estímulo). El INC se definió como máximo cuando se cumplieron los siguientes criterios: (i) ningún aumento adicional en el VO₂ entre las dos etapas sostenidas durante al menos 2 minutos a pesar de un fuerte estímulo (se alcanzaba la meseta del VO₂), (ii) la frecuencia cardíaca (FC) excede el 85% de su máximo previsto, y (iii) la relación del intercambio respiratorio supera 1.15 [2]. Inmediatamente después del agotamiento, se administró una fase de recuperación activa al ritmo de caminata de la participante durante 1 minuto, seguido de 3 minutos de recuperación pasiva.

Durante la segunda visita que tuvo lugar al menos 24 hs después de la primera visita, se realizó una prueba de HIIT supra-máxima. La velocidad se estableció en 120% de la velocidad más alta alcanzada durante el test INC, y la pendiente fue la misma que la etapa final del test INC. Al comienzo de la visita, las participantes se familiarizaron con el protocolo al simular una repetición al 120% de la velocidad más alta alcanzada por cada una de ellas durante el test INC, y luego la recuperación. Después de un descanso de 10 minutos, la prueba de HIIT comenzó con 1 minuto de caminata a una velocidad de 1 milla/h, seguido de un sprint intermitente de 1 minuto intercalado con una recuperación pasiva de 1 minuto hasta el agotamiento volitivo. Se registró el número total de repeticiones realizadas antes del agotamiento para definir el Rlim para cada participante.

Mediciones

Todas las evaluaciones de ejercicio se realizaron en una cinta de correr con freno electromecánico (VIASYS™) que estaba conectada y operada por un carro metabólico (MasterScreen CPX, CareFusion, Hoechst, Alemania), que también permitía mediciones continuas, respiro por respiro, de ventilación pulmonar por minuto (VE) e intercambio de gases en la boca (es decir, el VO₂ y la tasa de producción de dióxido de carbono [VCO₂]). Antes de cada prueba, los analizadores de gases y el medidor de flujo de la turbina del sistema se calibraron según las instrucciones del fabricante, utilizando una mezcla de gases de concentraciones conocidas (FO₂: 0.16; FCO₂: 0.05; N₂ como equilibrio) y un bombeo automático de alto y bajo flujo del sistema. La frecuencia cardíaca se determinó a partir del intervalo R-R en un electrocardiograma de 12 derivadas.

La oxigenación muscular se evaluó mediante una espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) portátil de onda continua y espacialmente resuelto con Bluetooth (PortaMon, Artinis, Países Bajos). Las concentraciones relativas de desoxihemoglobina + mioglobina (HHb) y oxihemoglobina + mioglobina (O₂Hb) y el índice de saturación tisular (TSI, %) [23], se registraron continuamente durante los ejercicios a nivel del tejido muscular periférico, 1,5 cm por debajo de la sonda (distancia de los interoptodos: 3 cm). A partir de estas mediciones, se calcularon los cambios relativos en la hemoglobina total y la mioglobina (THb = HHb + O₂Hb). La sonda NIRS se envolvió en una lámina de plástico y se colocó longitudinalmente al vasto lateral del vientre sobre el muslo derecho, 15 cm por encima del margen superior de la rótula, y se aseguró con una banda elástica para minimizar la posibilidad de que la luz externa influya en la señal. La frecuencia de muestreo se estableció en 1 Hz.

Análisis de datos

El VO₂máx individual se determinó analizando los datos del intercambio de gases respiro a respiro en el test INC. Si había una meseta (aumento de <2 ml·kg⁻¹·min⁻¹ a pesar de una mayor carga de trabajo [24,25]), el VO₂máx se calculó promediando los últimos 30 segundos registrados antes del agotamiento; de lo contrario, el valor más alto de VO₂ registrado en los últimos 30 segundos de la prueba se mantuvo como el VO₂máx individual [26]. La FC máxima se definió como el valor de FC más alto en los datos de respiro a respiro.

Para la fase de recuperación después del test INC, se aplicó un promedio de cinco respiraciones a los datos del VO₂ [27], previamente interpolados a intervalos de 1 segundo [28]. Los datos en el punto de tiempo 30, 60 y 120 segundos fueron elegidos para su posterior análisis. Para los datos de la NIRS (es decir, TSI y O₂Hb), los datos brutos de 1 Hz se usaron para calcular los puntos de tiempo a 30, 60 y 120 segundos, y t_{1/2} en la fase de recuperación. Se calcularon los cambios

del VO₂, la FC, la O₂Hb y TSI a los 0.5 minutos de recuperación después del test INC, como lo sugieren Turner y cols. [29]:

$$\Delta\text{VO}_2\ 0.5 = \text{VO}_2\text{máx} - \text{VO}_2 \text{ en 30 segundos en la fase de recuperación Eq 1}$$

$$\Delta\text{VO}_2\ 0.5/ = \Delta\text{VO}_2\text{0.5} / \text{VO}_2\text{máx} \text{ Eq 2}$$

Las ecuaciones anteriores también se aplicaron para determinar las deltas (es decir, la ecuación 1) y la relación de cambio (es decir, la ecuación 2) en el primer y segundo minuto, para los cuales la tasa de VO₂ fue la absorción de O₂ medida a los 60 y 120 segundos de la recuperación, respectivamente. Se utilizó el mismo enfoque para calcular la FC y las variables derivadas de la NIRS (TSI, O₂Hb), para los mismos puntos de tiempo durante la fase de recuperación de la prueba INC. Además, TSI_{rt1/2}, O₂Hb_{rt1/2}, VO₂_{rt1/2} y FC_{rt1/2} son los períodos de tiempo necesarios para que los valores alcancen la mitad de su recuperación al valor de referencia (Mínimo a Máximo) (Fig. 1).

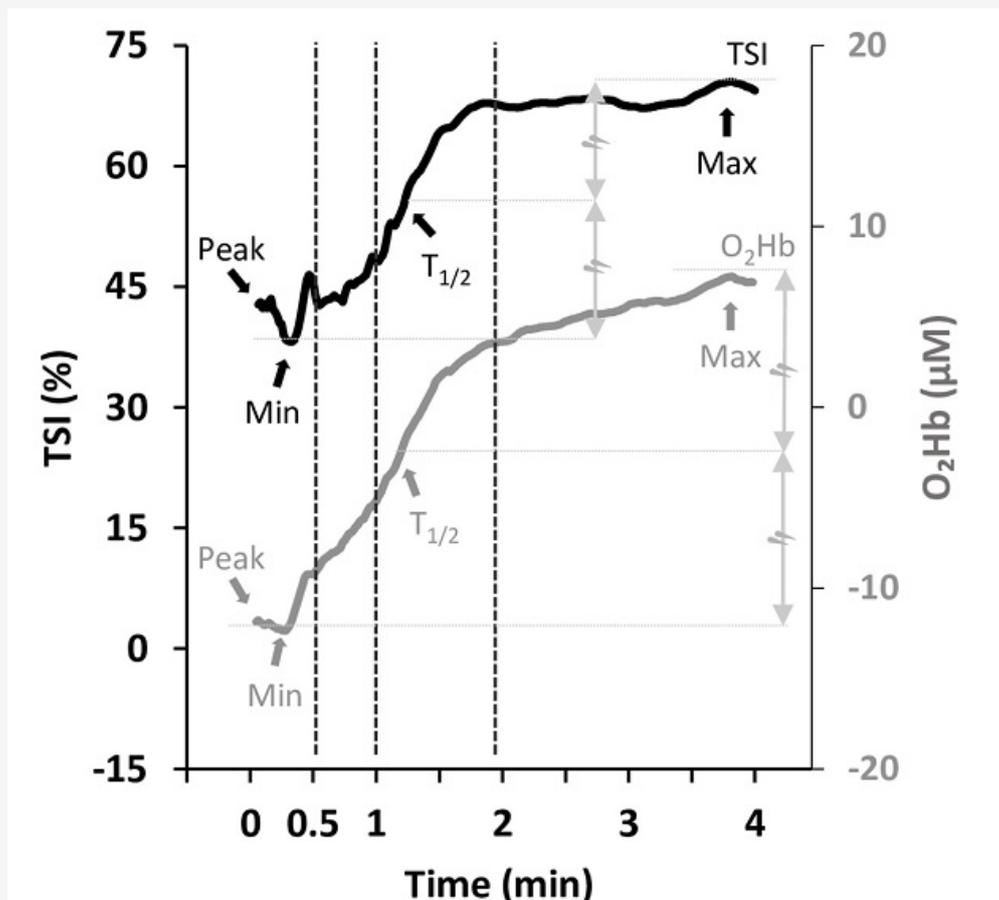


Figura 1. Índice de saturación del tejido derivado de la NIRS (TSI, trazo continuo negro) y respuestas oxigenadas (hemoglobina + mioglobina) (O₂Hb, trazo continuo gris) durante la fase de recuperación de las pruebas de ejercicio incremental (INC). Las flechas codificadas por colores indican los valores máximos (Máx.) y mínimo (Mín.) Para ambos parámetros alcanzados durante la recuperación; El pico indica el valor alcanzado al final de la prueba incremental (en el minuto cero, 0, en el eje x).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226313.g001>

Análisis estadístico

Los datos se presentan como promedios y desviaciones estándar (SDs). La significación estadística se estableció en $p < 0,05$. Las correlaciones de Pearson, Spearman y correlaciones parciales se utilizaron para determinar el grado de asociación entre las variables antropométricas y fisiológicas versus el Rlim. Dado que el tamaño de la muestra de la población asignada al análisis final fue de 47, los primeros cinco parámetros con los mayores coeficientes de correlación se incluyeron en el modelo de regresión. Se realizó una regresión lineal progresiva para identificar los predictores del Rlim. Los análisis se realizaron con SPSS 22.0 (SPSS, Inc., Chicago, IL, EE. UU.).

Resultados

Cuarenta y siete participantes (n = 23 atletas; n = 24 MA) completaron con éxito las fases del protocolo experimental. Todas las participantes alcanzaron una meseta del VO₂ al final de la prueba INC. El Rlim difirió mucho entre las participantes y osciló entre 2.6 y 12.0 repeticiones. Las correlaciones de Pearson o Spearman mostraron que el Rlim se correlacionó significativamente con la edad (r = -0.748), el grupo (r = 0.74) y el porcentaje de grasa corporal ([PBF] r = 0.371). La edad se correlacionó aún significativamente con el Rlim (R = -0.518; p < 0.0001) después de ajustar las variables con co-linealidad, incluyendo el grupo y el PBF en correlaciones parciales (Fig. 2). El PBF no se correlacionó con el Rlim después de ajustar por edad y grupo (R = -0.194, p = 0.201). Cuando el HIIT y el INC se compararon mediante análisis univariados, varios parámetros fisiológicos durante el INC se correlacionaron significativamente con el Rlim. Los parámetros con un coeficiente de correlación >0.3 y valores de p < 0.05 se muestran en S1. Los cinco parámetros fisiológicos con los coeficientes de correlación más altos (Δ VO₂₂, VO₂máx, Δ FC2 /, TSIINC y Δ FC2) se evaluaron en el modelo de regresión lineal por pasos siguientes (Tabla 1). La Potencia explicativa en el modelo 3 de regresión lineal múltiple fue de 0.415. Reveló que el Rlim se determinó principalmente por Δ VO₂₂, Δ FC2 / y TSIINC. Sus diagramas de dispersión para el Rlim se muestran en la Fig. 3. Las correlaciones fueron positivas en Δ VO₂₂ y Δ FC2/ y negativas en TSIINC (Fig. 3A, 3B y 3C

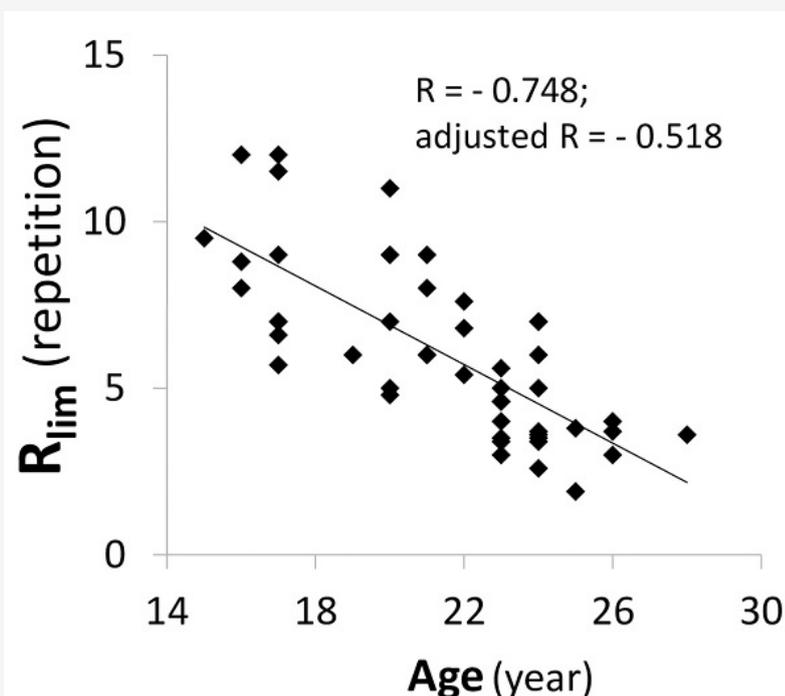


Figura 2. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre el número total de repeticiones del test de intervalos de alta intensidad y la edad (Panel A). Se utilizó una correlación parcial para ajustar las variables con co-linealidad, incluido el grupo y el porcentaje de grasa corporal (PBF).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226313.g002>

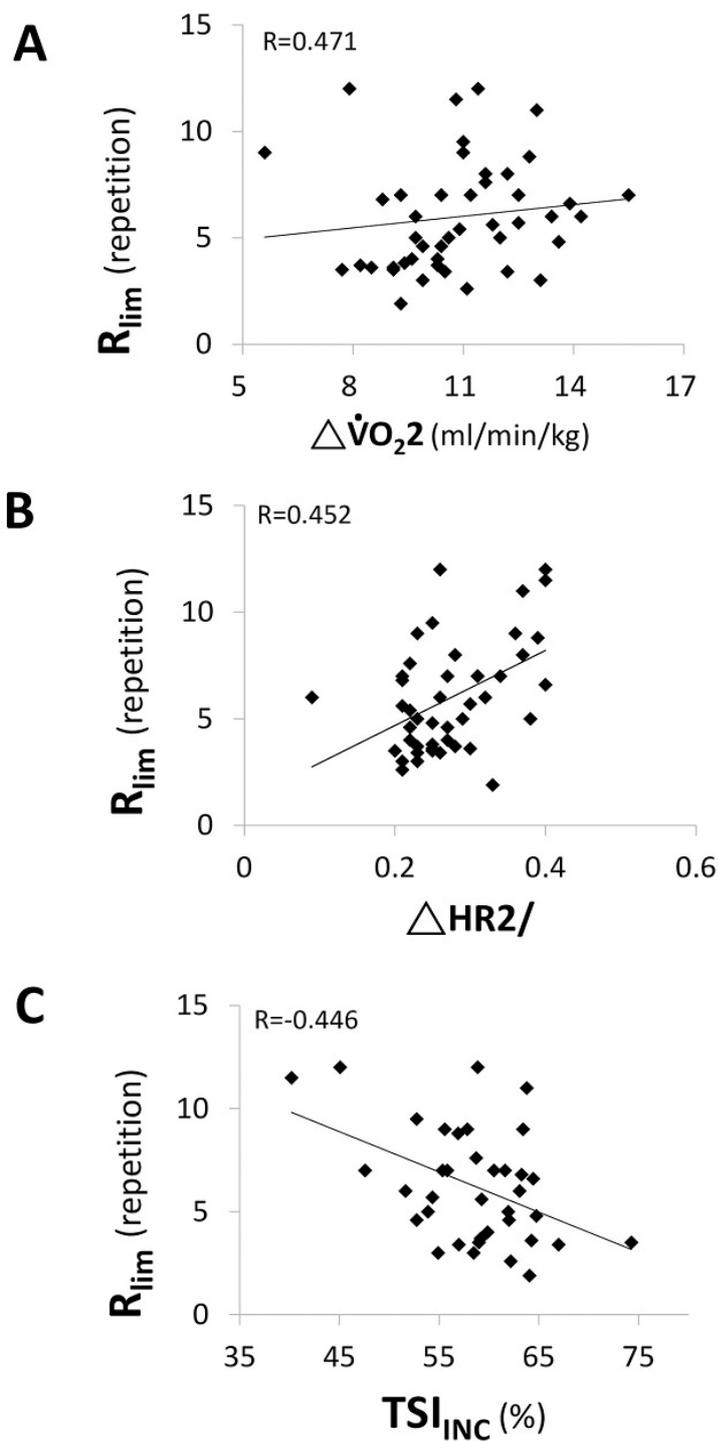
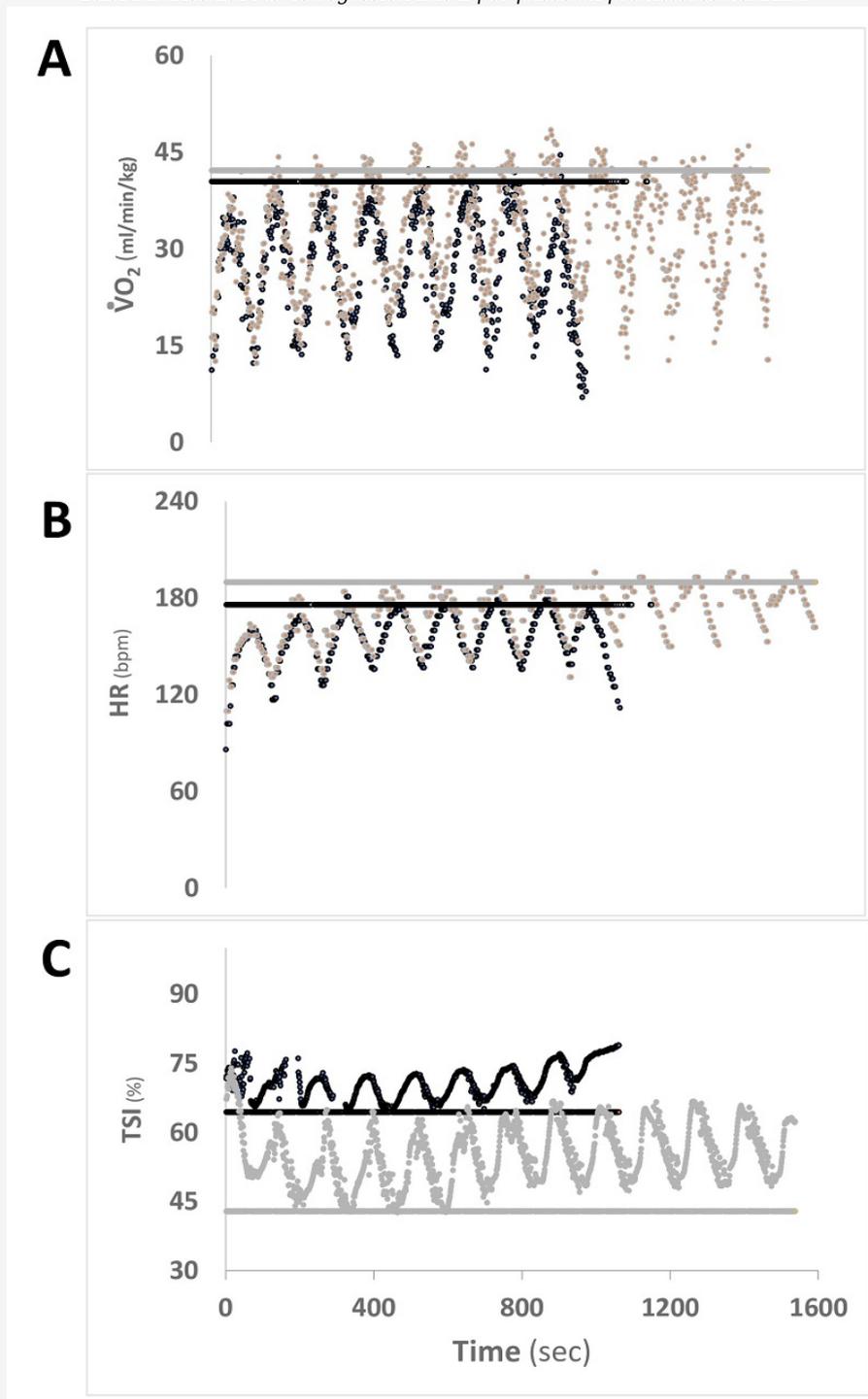


Figura 3. Gráficos de dispersión que muestran la relación entre el número total de repeticiones del test de intervalos de alta intensidad y ΔVO_{22} (= $VO_{2m\acute{a}x}-VO_2$ a los 2 minutos durante la recuperación; Panel A), $\Delta FC2/(FC_{m\acute{a}x} - FC$ a los 2 minutos durante la recuperación)/ $FC_{m\acute{a}x}$; Panel B) o TSI_{INC} (índice de saturación del tejido al agotamiento; Panel C), determinado por datos del test de ejercicio incremental.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226313.g003>

Tabla 1. Resultados de regresión lineal por pasos en predictores del Rlim.



<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226313.t001>

Los principales hallazgos del INC y del HIIT se presentan en la Tabla 2. Como se esperaba, las atletas tuvieron un VO_2 máx significativamente más alto, un pulso de O_2 máximo, un VE pico, un TSIINC más bajo y un mejor rendimiento en HIIT (Rlim: 7.8 ± 2.3 vs. 4.2 ± 1.4 , $p < 0.05$) en comparación con las participantes MA.

Tabla 2. Valores promedio de parámetros fisiológicos para los grupos de atletas y de MA en las pruebas INC y HIIT.

	β	t	P(β)	R	ΔR^2	F
Model 1				0.471	0.222	9.396*
$\Delta \dot{V}O_{2,2}$	0.471	3.065	0.04			
Model 2				0.572	0.106	7.798*
$\Delta \dot{V}O_{2,2}$	0.368	2.419	0.021			
$\Delta HR_2/$	0.342	2.247	0.032			
Model 3				0.644	0.086	7.304*
$\Delta \dot{V}O_{2,2}$	0.282	1.884	0.069			
$\Delta HR_2/$	0.317	2.192	0.036			
TSI_{peak}	-0.309	-2.139	0.040			

*p <0.05; the p-value indicates the overall significance of the linear regression model

P(β): p-value for β

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226313.t002>

Los principales resultados en la fase de recuperación del test INC se presentan en la Tabla 3. La recuperación de la frecuencia cardíaca y del VO2 fue más rápida en las atletas que en las participantes MA. La recuperación de la oxigenación muscular no mostró diferencias entre los grupos; mientras que $\Delta FC_2/$ y $\Delta VO_{2,2}$, los principales determinantes del Rlim de acuerdo con la regresión gradual (Tabla 1), fueron significativamente mayores en las atletas que en las participantes MA.

Tabla 3. Comparación de la respuesta fisiológica de los grupos de atletas y AM durante la fase de recuperación al final de las pruebas de ejercicio incremental máximo.

	Ath	MA
INC		
$\dot{V}O_{2max}$ (mL.min ⁻¹ .Kg ⁻¹)	45.7 ± 6.0*	37.8 ± 7.6
peak HR (bpm)	185.0 ± 8.4	187.4 ± 10.0
peak O ₂ pulse (mL per beat)	12.8 ± 1.8*	10.4 ± 1.9
EqCO ₂ nadir	24.3 ± 2.2	24.1 ± 2.2
EqO ₂ nadir	20.4 ± 2.1	21.1 ± 2.7
peak V _E (mL.min ⁻¹)	83.0 ± 13.5*	76.3 ± 14.0
V _E /VCO ₂ slope	26.8 ± 3.3	25.4 ± 6.9
TSI _{INC} (%)	56.4 ± 6.6*	61.0 ± 5.1
HHb _{peak} (μM)	0.9 ± 5.0	2.1 ± 5.0
O ₂ Hb _{peak} (μM)	-4.1 ± 4.7	-6.6 ± 4.5
THb _{peak} (μM)	-3.3 ± 6.5	-4.5 ± 7.9
HIIT		
R _{lim} (repetition)	7.8 ± 2.3*	4.2 ± 1.4

Values are shown as mean ± SD

* p <0.05 in Mann-Whitney U test; INC: maximal incremental exercise testing; HIIT: high-intensity interval testing; Ath: athletes; MA: moderately active participants; HR: heart rate; V_E: ventilation; TSI: tissue saturation index; HHb: deoxyhemoglobin; O₂Hb: oxyhemoglobin; THb: total hemoglobin; TSI_{peak}: nadir of tissue saturation index during INC; EqCO₂: ventilator equivalent for CO₂; EqO₂: ventilatory equivalent for O₂

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226313.t003>

Los datos antropométricos no mostraron diferencias en el peso corporal, la altura corporal y el índice de masa corporal (IMC); sin embargo, la edad fue significativamente diferente entre los grupos (Ath vs. MA = 19±3 vs. 24±2 años; $p < 0.05$) entre atletas y participantes MA. La Tabla 4 muestra los datos de la composición corporal. Las atletas tenían mayor masa magra suave (SLM), masa muscular esquelética (SMM), masa muscular segmentaria en el brazo derecho (SMRA), masa muscular segmentaria en la pierna derecha (SMRL), masa muscular segmentaria en el tronco (SMTR), masa sin grasa (FFM), proteína, masa celular corporal (BCM) y PBF más bajo que el grupo MA. Los valores p de la masa muscular segmentaria en el brazo izquierdo (SMLA) y la masa muscular segmentaria en la pierna izquierda (SMLL) fueron 0.051 y 0.055, respectivamente.

Tabla 4. Características de la composición corporal de las participantes.

	Ath	MA		Ath	MA		Ath	MA		Ath	MA
$\Delta HR_{0.5}$	9.4 ± 6.3	8.8 ± 3.5	$\Delta \dot{V}O_{2,0.5}$	14.1 ± 5.9*	8.8 ± 3.5	$\Delta TSI_{0.5}$	3.52 ± 3.42	3.01 ± 2.50	$\Delta O_2Hb_{0.5}$	3.73 ± 2.52	3.05 ± 2.33
ΔHR_1	24.2 ± 9.0	20.1 ± 6.3	$\Delta \dot{V}O_{2,1}$	23.8 ± 4.3*	20.1 ± 6.3	$\Delta TSI_{1.0}$	8.19 ± 4.42	7.35 ± 3.55	$\Delta O_2Hb_{1.0}$	8.24 ± 3.05	7.72 ± 4.00
ΔHR_2	56.5 ± 11.8*	45.5 ± 10.1	$\Delta \dot{V}O_{2,2}$	34.6 ± 5.5*	27.6 ± 6.8	$\Delta TSI_{2.0}$	12.73 ± 6.47	11.23 ± 2.93	$\Delta O_2Hb_{2.0}$	11.82 ± 3.37	10.94 ± 4.53
$\Delta HR_{0.5}/$	0.05 ± 0.03	0.05 ± 0.02	$\Delta \dot{V}O_{2,0.5}/$	0.3 ± 0.1	0.05 ± 0.02	$\Delta TSI_{0.5}/$	0.23 ± 0.21	0.21 ± 1.16	$\Delta O_2Hb_{0.5}/$	0.27 ± 0.17	0.20 ± 0.13
$\Delta HR_1/$	0.13 ± 0.05	0.11 ± 0.03	$\Delta \dot{V}O_{2,1}/$	0.5 ± 0.1	0.11 ± 0.03	$\Delta TSI_{1.0}/$	0.57 ± 0.23	0.51 ± 0.21	$\Delta O_2Hb_{1.0}/$	0.59 ± 0.16	0.50 ± 0.19
$\Delta HR_2/$	0.31 ± 0.06*	0.24 ± 0.06	$\Delta \dot{V}O_{2,2}/$	0.7 ± 0.0	0.24 ± 0.06	$\Delta TSI_{2.0}/$	0.84 ± 0.16	0.77 ± 0.15	$\Delta O_2Hb_{2.0}/$	0.83 ± 0.12	0.70 ± 0.19
$HR_{r_{1/2}}$ (s)	84.9 ± 18.6	92.4 ± 12.2	$\dot{V}O_{2r_{1/2}}$ (s)	53.5 ± 8.6	92.4 ± 12.2	$TSI_{r_{1/2}}$ (s)	53.1 ± 14.1	29.3 ± 14.1	$O_2Hb_{r_{1/2}}$ (s)	59.5 ± 23.7	49.0 ± 15.6

Data are mean ± SD

* Ath vs. MA, $p < 0.05$ in Mann-Whitney U test

Ath: athletes; MA: moderately active participants

$\Delta HR_{0.5}$ (min^{-1}) = peak HR – HR at 0.5 min recovery; ΔHR_1 (min^{-1}) = peak HR – HR at 1 min recovery; ΔHR_2 (min^{-1}) = peak HR – HR at 2 min recovery; $\Delta HR_{0.5}/$ = $\Delta HR_{0.5}$ / maximal HR; $\Delta HR_1/$ = ΔHR_1 / maximal HR; $\Delta HR_2/$ = ΔHR_2 /maximal

The above equations also applied to $\dot{V}O_2$ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{Kg}^{-1}$)

$\Delta TSI_{0.5}$ (μM) = TSI at 0.5 min recovery—peak TSI; ΔTSI_1 (μM) = TSI at 1 min recovery—peak TSI; ΔTSI_2 (μM) = TSI at 2 min recovery—peak TSI; $\Delta TSI_{0.5}/$ = $\Delta TSI_{0.5}$ / (maximal TSI–minimal TSI) recovery; $\Delta TSI_1/$ = ΔTSI_1 / (maximal TSI–minimal TSI) recovery; $\Delta TSI_2/$ = ΔTSI_2 / (maximal TSI–minimal TSI) recovery

The above equations also applied to O_2Hb (μM)

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226313.t004>

Discusión

Este estudio descriptivo tuvo como objetivo investigar la relación entre la capacidad de mantener el HIIT y el nivel de fitness, determinado por un protocolo incremental de Bruce modificado. Consideramos el número de repeticiones de HIIT completadas como el índice de tolerancia para cada participante (es decir, cuanto mayor sea el número de repeticiones HIIT completadas, mayor será la tolerancia al esfuerzo). Nuestros resultados mostraron que el número total de repeticiones necesarias para alcanzar el límite del participante (R_{lim}) se distribuyó ampliamente entre la población de estudio, con un rango de 2.6 a 12.0 repeticiones (media: 6.0 ± 2.6 repeticiones). Los análisis de regresión lineal mostraron que la recuperación de la FC, la recuperación del VO_2 y el TSIINC fueron las principales variables que determinaron la capacidad de realizar HIIT durante largas duraciones (es decir, un mayor número de repeticiones realizadas).

Parámetros derivados del test INC que influyen en el R_{lim}

Tradicionalmente, se han realizado pruebas INC para obtener una cuantificación fisiológica (por ejemplo, el $VO_{2\text{máx}}$) que refleje el fitness cardiopulmonar de todo el cuerpo de un individuo. El $VO_{2\text{máx}}$, el parámetro principal determinado por los procedimientos de test INC, y el umbral anaeróbico, se usan para describir la capacidad del sistema cardiopulmonar para integrarse con las actividades metabólicas y del sistema nervioso central [3]. En este estudio, los participantes pudieron alcanzar valores de $VO_{2\text{máx}}$ similares al final de la prueba INC (Fig. 4A), pero diferían significativamente en el número de repeticiones realizadas al final del HIIT (ver ejemplo de dos sujetos representativos que completaron 12.0 vs. 7.7 repeticiones, respectivamente; Fig. 4). Para determinar qué parámetros fisiológicos pueden explicar la gran varianza del R_{lim} en esta cohorte, se realizaron análisis de regresión lineal.

	Ath	MA
SMM (Kg)	23.6 ± 2.3*	22.2 ± 2.3
Fat (Kg)	11.8 ± 2.7	13.7 ± 3.8
PBF (%)	21.5 ± 4.1*	24.9 ± 4.5
SLM (Kg)	40.4 ± 3.7*	38.3 ± 3.7
FFM (Kg)	42.9 ± 3.9*	40.6 ± 3.9
SMRA (Kg)	2.1 ± 0.3*	1.9 ± 0.3
SMLA (Kg)	2.0 ± 0.3	1.9 ± 0.3
SMTR (Kg)	18.8 ± 1.8*	17.9 ± 1.7
SMRL (Kg)	6.9 ± 0.8*	6.5 ± 0.8
SMLL (Kg)	6.9 ± 0.7	6.6 ± 0.8
Protein (Kg)	8.5 ± 0.8*	8.0 ± 0.8
BCM (Kg)	28.0 ± 2.6*	26.6 ± 2.6
TBM/FFM (%)	73.3 ± 0.2	73.3 ± 0.2

Value are shown as Mean ± SD

* $p < 0.05$ in Mann-Whitney U test; Ath: athletes; MA: moderately active subjects; SMM: Skeletal Muscle Mass; PBF: percent body fat; SLM: Soft Lean Mass; FFM: Fat Free Mass; SMRA: segmental muscle right arm; SMLA: segmental muscle left arm; SMTR: segmental muscle trunk; SMRL: segmental muscle right leg; SMLL: segmental muscle left leg; BCM: body cell mass; TBM/FFM: total body mass/fat free mass

Figura 4. Respuestas fisiológicas del HIIT de dos participantes representativos para: ΔVO_2 (Panel A), FC (Panel B) y TSI (Panel C). Ejemplo de una participante capaz de completar un mayor número de repeticiones HIIT (en gris); Las marcas oscuras representan un sujeto con menor tolerancia al HIIT. Las líneas continuas horizontales representan los valores máximos para los respectivos parámetros fisiológicos alcanzados al final de la prueba INC. HIIT: test de intervalo de alta intensidad, INC: test de ejercicio incremental máximo, VO_2 : consumo de oxígeno, TSIINC: índice de saturación de tejido durante el test INC.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226313.g004>

Se descubrió que la recuperación del VO_2 (ΔVO_{22}), en lugar del $VO_{2\text{máx}}$, fue el determinante más fuerte del Rlim. Este resultado está de acuerdo con un estudio previo de Harris y cols. [30], que investigó el curso temporal de la resíntesis de fosfocreatina (PCr) en un grupo de adultos sometidos a una prueba máxima realizada con un cicloergómetro. Estos autores observaron que la cinética de la recuperación muscular después del ejercicio máximo exhaustivo era bifásica, con un componente de aláctico, que oscilaba entre 10 segundos y unos pocos minutos, y que el componente de lactácido duraba unos minutos u horas [31,32]. El componente de aláctico consiste en trifosfato de adenosina dependiente del oxígeno (ATP) repuesto con PCr, que es la vía de reposición de energía primaria durante el HIIT. Las participantes con un reabastecimiento del ATP/PCr más rápido, tienen una recuperación del VO_2 más rápida en los primeros minutos después del ejercicio exhaustivo dinámico y, por lo tanto, tienen una reserva de VO_2 más amplia para la próxima repetición de HIIT. Como lo demuestra nuestro modelo estadístico, estos individuos se caracterizan por la presencia de un alto Rlim.

El segundo parámetro que parece determinar la capacidad de rendimiento durante el HIIT es la recuperación de la FC (ΔFC_2). Esto refleja la capacidad reguladora de los sistemas nerviosos autónomos cardíacos [33]. Estudios anteriores mostraron que la recuperación de la FC está relacionada con el $VO_{2\text{máx}}$ [34-36] y el estado de entrenamiento [37,38]. El presente estudio descubrió además que también está relacionado con el rendimiento en el HIIT. Durante el HIIT, una recuperación de la FC más rápida sugiere la presencia de una reserva de FC más amplia para la próxima repetición. Esto destaca el papel de la regulación del sistema nervioso autónomo cardíaco en la determinación del rendimiento de HIIT.

Además de la tasa de recuperación del VO_2 y de la FC, se encontró que el TSIINC es el tercer parámetro significativo para explicar la variación en el Rlim entre las participantes del estudio. El índice de saturación de los tejidos representa un equilibrio entre el suministro y el consumo de oxígeno muscular [39,40]. Se ha demostrado un aumento en el TSI acompañado de un aumento en la biogénesis mitocondrial, la capilarización y la actividad enzimática mitocondrial después del entrenamiento de HIIT [41-43]. Es probable que las participantes que alcanzaron un TSIINC más bajo al final del

protocolo INC tuvieron una mayor tolerancia a la acidosis metabólica muscular periférica y, por lo tanto, una mayor capacidad para mantener los esfuerzos de HIIT, lo que resultó en un mayor Rlim.

Además, el Rlim y la edad mostraron una fuerte relación entre las participantes jóvenes adultas que se ofrecieron como voluntarias para participar en este estudio (rango de edad: 15-28 años). Este hallazgo parece sugerir que la capacidad de mantener largas duraciones de HIIT está relacionada con la madurez (edad) del participante sometido a la prueba. Ratel y col. [44] compararon la capacidad de recuperación de niños prepúberes ($n = 11$; edad, 9.6 ± 0.7 años), niños pubescentes ($n = 9$; edad, 15 ± 0.7 años) y hombres adultos ($n = 10$; edad, 20.4 ± 0.8 años) utilizando una prueba de cicloergómetro de sprints intermitentes de diez repeticiones (carga de fricción = 50% de fuerza óptima), separada por duraciones de recuperación pasiva de 30 segundos, 1 y 5 minutos. La capacidad de mantener la potencia máxima de pedaleo desde la primera hasta la décima serie, disminuyó ($p < 0.01$) en un 11.3% en hombres adultos, 15.3% en niños pubescentes, y no se notaron cambios en el grupo prepubescente, cuando el intervalo de recuperación fue de 1 minuto (la misma duración aplicada en el estudio actual para la prueba HIIT). Sus hallazgos [44] sugieren que para las categorías de pubescentes y adultos, se necesitaba un mayor tiempo de recuperación debido a una mayor actividad glucolítica muscular y una resíntesis de PCr más lenta. Del mismo modo, en un estudio de Zafeiridis y cols. [45], se investigó el efecto de la edad con respecto a la capacidad de recuperación después de ejercicios de fuerza isocinética intermitente de alta intensidad. Grupos de niños (edad, 11.4 ± 0.5 años), de adolescentes (edad, 14.7 ± 0.4 años) y de hombres (edad, 24.1 ± 2 años) fueron reclutados, y cada grupo realizó dos series de ejercicios de turnos de 30 y 60 segundos de duración, separados por períodos de descanso de 1 y 2 minutos, respectivamente. Los resultados mostraron que los adolescentes tendían a recuperarse más rápido que los hombres, lo que sugiere que la tasa de recuperación para ambos tipos de tareas estaba relacionada con la edad. En consecuencia, la capacidad de recuperación del rendimiento anaeróbico disminuye con la edad, y la disminución comienza desde los 9 a 11 años. La disminución de la capacidad de ejercicio relacionada con la edad es multifactorial e involucra elementos tales como la disminución de las concentraciones intramusculares de PCr y creatina quinasa intramuscular, las tasas de hidrólisis de la PCr y las actividades enzimáticas glucolíticas, así como los cambios en la arquitectura muscular y la velocidad de activación neural [31,46-50]. Además, los adolescentes más jóvenes dependen menos de la glucólisis anaeróbica y más del metabolismo aeróbico que los adolescentes mayores [51,52]. En consecuencia, es probable que los primeros experimenten menos fatiga y se recuperen más rápidamente que los segundos en los tests de HIIT. Sin embargo, debido al amplio rango de edad y los tipos de ejercicio (aeróbico o anaeróbico) [53-55], los mecanismos subyacentes a la disminución relacionada con la edad en el rendimiento anaeróbico de adolescentes a adultos jóvenes aún no están claros.

Los parámetros de la FC, la recuperación del VO₂ y del TSI al final del test INC mostraron un poder explicativo de 0.415 (Modelo 3, Tabla 1). Esto sugiere que se deben considerar factores adicionales para explicar la varianza en el Rlim observada en nuestra cohorte. Un factor plausible podría ser la motivación y el cumplimiento de las participantes. Como informó recientemente Noakes y cols. [56,57], aunque el fitness aeróbico y el sistema nervioso central juegan un papel importante, la condición biológica de las atletas al inicio del ejercicio (por ejemplo, un estado emocional como la autoestima motivacional; fatiga mental y física) afecta en parte al rendimiento de un/una ejercitante.

Limitaciones

Este estudio tiene algunas limitaciones. Primero, nuestros hallazgos podrían aplicarse a protocolos HIIT similares al utilizado en este estudio, pero podrían no ser consistentes para otros protocolos HIIT donde se establece un formato diferente de trabajo/recuperación (por ejemplo, duración de repetición, intensidad) o si la tolerancia es evaluada con pruebas de campo.

En segundo lugar, podría parecer bastante sorprendente que los valores de FC y VO₂ durante el segundo minuto de recuperación después del test INC (es decir, ΔVO_{22} , $\Delta\text{FC}_{2/}$) mostraran una correlación más fuerte con el Rlim que los medidos inmediatamente después del final de la misma prueba (es decir, a los 30 y 60 segundos). Estos hallazgos pueden explicarse parcialmente por la diferencia existente entre la recuperación activa y pasiva. Durante la fase de recuperación, todos los participantes recibieron instrucciones de caminar a su propia velocidad cómoda en 0% de grado durante 1 minuto (recuperación activa) y permanecer quietos durante 2 minutos adicionales (recuperación pasiva). Sin embargo, las FCs disminuyeron menos en la recuperación activa que en la recuperación pasiva, donde este último tiene un control central más bajo de la corteza motora y la actividad del receptor mecano-metabólico muscular de las contracciones del músculo esquelético [58]. El VO₂ de recuperación también es mayor en la recuperación activa que en la pasiva [59]. La competencia por el oxígeno entre la reposición de la PCr y la actividad muscular durante la recuperación activa produce un mayor VO₂ [60,61]. En el primer minuto de recuperación activa, la cinética de recuperación no fue comparable entre las participantes.

En tercer lugar, existen limitaciones en el uso de la metodología de NIRS para estimar el metabolismo muscular. El alto contenido de melanina y el gran grosor del tejido adiposo (ATT) pueden causar atenuación de la señal, reduciendo la cantidad de luz que llega al tejido muscular bajo investigación. Sin embargo, el bajo contenido de melanina (todas las participantes eran de etnia asiática) y un ATT promedio por debajo de 1.6-1.8 mm para toda la cohorte, confirmaron la

confiabilidad de nuestros datos de NIRS [62].

Además, las participantes incluidas en nuestro estudio eran todas mujeres. Aunque sólo unos pocos estudios en la literatura han incluido un gran número similar de mujeres como en este estudio, la influencia del sexo en los resultados de nuestros análisis merece más investigación. Si bien los ciclos menstruales y los anticonceptivos orales no fueron controlados ni documentados en el momento de la prueba, hay evidencia disponible que demuestra que ni las fluctuaciones hormonales entre los ciclos menstruales ni los anticonceptivos orales de baja dosis utilizados por las atletas en la actualidad tienen efectos detectables en el rendimiento máximo del ejercicio [63].

Finalmente, para este estudio, la intensidad de los ejercicios HIIT se calculó como un porcentaje fijo de la velocidad más alta alcanzada al final de la prueba INC. El uso de un porcentaje fijo derivado del INC para calcular la tasa de trabajo HIIT, debe considerarse otro determinante de la variabilidad en los resultados del Rlim en este contexto. En 2019, Iannetta y cols. [64] informaron que cuando las tasas de trabajo se establecen como porcentaje fijo de parámetros medidos en una capacidad máxima de ejercicio, dada la variabilidad entre sujetos en porcentajes que definen la intensidad de un dominio de ejercicio (es decir, moderado, pesado, severo, extremo [65]), se espera una mayor variación en el estímulo/respuesta metabólica. En nuestro estudio, esto se correlaciona con el estrés metabólico y el trabajo relativo desigual visto en las respuestas de las participantes de HIIT (por ej., el consumo de oxígeno varió entre 82-91% y 95.4-112% del VO₂máx individual durante la primera y siguientes repeticiones de HIIT, respectivamente; Fig. 4A). Para garantizar un control preciso de la intensidad del ejercicio entre los participantes y reducir los errores en las comparaciones, los estudios futuros sobre la respuesta fisiológica en dominios específicos de intensidad del ejercicio deberían adoptar enfoques metodológicos, que consideren umbrales fisiológicos individuales y modelos de dominio de intensidad del ejercicio como los propuestos por Iannetta y colegas [64].

Conclusión

La capacidad de sostener un ejercicio HIIT, determinado por el número de repeticiones realizadas antes del agotamiento (es decir, el Rlim) difiere mucho entre las atletas jóvenes adultas. Las tasas de recuperación de VO₂ y FC después de las pruebas incrementales y los niveles de saturación muscular periférica en el agotamiento en el test INC, son los principales factores fisiológicos relacionados con el Rlim. Además, la edad representa un factor adicional que influye en el Rlim.

Estos hallazgos proporcionan información sobre la importancia de la fase de recuperación después de las pruebas de ejercicio INC máximas. Los valores derivados de la fase de recuperación predicen específicamente el rendimiento de HIIT y posiblemente predicen el rendimiento deportivo cuando se requieren esfuerzos repetidos de alta intensidad. Según nuestros hallazgos, se justifica una investigación futura sobre el uso de una combinación de pruebas INC y de HIIT para determinar la mejora del rendimiento de los atletas después del entrenamiento HIIT.

Información adicional

S1 Tabla. Coeficientes de correlación de Pearson entre Rlim y variables cardio-respiratorias derivadas de INC para todo el grupo de participantes.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226313.s001>

REFERENCIAS

1. Arena R, Sietsema KE. (2011). Cardiopulmonary exercise testing in the clinical evaluation of patients with heart and lung disease. *Circulation*. 2011;123(6):668-80. Epub 2011/02/16. pmid:21321183.
2. Balady GJ, Arena R, Sietsema K, Myers J, Coke L, Fletcher GF, et al. (2010). Clinician's Guide to cardiopulmonary exercise testing in adults: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*. 2010;122(2):191-225. Epub 2010/06/30. pmid:20585013.
3. Day JR, Rossiter HB, Coats EM, Skasick A, Whipp BJ. (2003). The maximally attainable VO₂ during exercise in humans: the peak vs. maximum issue. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md: 1985)*. 2003;95(5):1901-7. Epub 2003/07/15. pmid:12857763.
4. Beltz NM, Gibson AL, Janot JM, Kravitz L, Mermier CM, Dalleck LC. (2016). Graded Exercise Testing Protocols for the Determination of VO₂max: Historical Perspectives, Progress, and Future Considerations. *J Sports Med (Hindawi Publ Corp)*. 2016; 2016:3968393. Epub 2017/01/25. pmid:28116349; PubMed Central PMCID: PMC5221270.
5. Taylor HL, Buskirk E, Henschel A. (1955). Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *J Appl Physiol*. 1955;8(1):73-80. Epub 1955/07/01. pmid:13242493.
6. Muscat KM, Kotrach HG, Wilkinson-Maitland CA, Schaeffer MR, Mendonca CT, Jensen D. (2015). Physiological and perceptual responses to incremental exercise testing in healthy men: effect of exercise test modality. *Appl Physiol Nutr Metab*.

- 2015;40(11):1199-209. Epub 2015/10/27. pmid:26501683.
7. Dolci F, Kilding AE, Chivers P, Piggott B, Hart NH. (2020). High-Intensity Interval Training Shock Microcycle for Enhancing Sport Performance: A Brief Review. *Journal of strength and conditioning research*. 2020. Epub 2020/01/07. pmid:31904712.
 8. Gibala MJ, Little JP, Macdonald MJ, Hawley JA. (2012). Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. *J Physiol*. 2012;590(5):1077-84. Epub 2012/02/01. pmid:22289907; PubMed Central PMCID: PMC3381816.
 9. Gibala MJ, McGee SL. (2008). Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training: a little pain for a lot of gain? *Exerc Sport Sci Rev*. 2008;36(2):58-63. Epub 2008/03/26. pmid:18362686.
 10. Tabata I, Irisawa K, Kouzaki M, Nishimura K, Ogita F, Miyachi M. (1997). Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Medicine and science in sports and exercise*. 1997;29(3):390-5. Epub 1997/03/01. pmid:9139179.
 11. Huang SC, Wong MK, Lin PJ, Tsai FC, Fu TC, Wen MS, et al. (2014). Modified high-intensity interval training increases peak cardiac power output in patients with heart failure. *European journal of applied physiology*. 2014;114(9):1853-62. Epub 2014/06/02. pmid:24880226.
 12. Bacon AP, Carter RE, Ogle EA, Joyner MJ. (2013). VO2max trainability and high intensity interval training in humans: a meta-analysis. *PLoS One*. 2013;8(9):e73182. Epub 2013/09/26. pmid:24066036; PubMed Central PMCID: PMC3774727.
 13. Jones AM, Vanhatalo A. (2017). The 'Critical Power' Concept: Applications to Sports Performance with a Focus on Intermittent High-Intensity Exercise. *Sports medicine (Auckland, NZ)*. 2017;47(Suppl 1):65-78. Epub 2017/03/24. pmid:28332113; PubMed Central PMCID: PMC5371646.
 14. Kavaliuskas M, Steer TP, Babraj JA. (2017). Cardiorespiratory fitness and aerobic performance adaptations to a 4-week sprint interval training in young healthy untrained females. *Sport sciences for health*. 2017;13(1):17-23. Epub 2017/05/10. pmid:28479931; PubMed Central PMCID: PMC5397461.
 15. Christensen PM, Krstrup P, Gunnarsson TP, Kiilerich K, Nybo L, Bangsbo J. (2011). VO2 kinetics and performance in soccer players after intense training and inactivity. *Medicine and science in sports and exercise*. 2011;43(9):1716-24. Epub 2011/02/12. pmid:21311360.
 16. Fernandez-Fernandez J, Sanz-Rivas D, Sarabia JM, Moya M. (2015). Preseason Training: The Effects of a 17-Day High-Intensity Shock Microcycle in Elite Tennis Players. *J Sports Sci Med*. 2015;14(4):783-91. Epub 2015/12/15. pmid:26664275; PubMed Central PMCID: PMC4657421.
 17. Paul DJ, Marques JB, Nassiss GP. (2018). The effect of a concentrated period of soccer-specific fitness training with small-sided games on physical fitness in youth players. *J Sports Med Phys Fitness*. 2019;59(6):962-8. Epub 2018/06/29. pmid:29952179.
 18. Wahl P, Guldner M, Mester J. (2014). Effects and sustainability of a 13-day high-intensity shock microcycle in soccer. *J Sports Sci Med*. 2014;13(2):259-65. Epub 2014/05/03. pmid:24790477; PubMed Central PMCID: PMC3990877.
 19. Bull FC, Maslin TS, Armstrong T. (2009). Global physical activity questionnaire (GPAQ): nine country reliability and validity study. *Journal of physical activity & health*. 2009;6(6):790-804. Epub 2010/01/28. pmid:20101923.
 20. Murakami K, Hirano H, Watanabe Y, Edahiro A, Ohara Y, Yoshida H, et al. (2015). Relationship between swallowing function and the skeletal muscle mass of older adults requiring long-term care. *Geriatrics & gerontology international*. 2015;15(10):1185-92. Epub 2015/08/15. pmid:26272767.
 21. Morishita Y, Kubo K, Haga Y, Miki A, Ishibashi K, Kusano E, et al. (2014). Skeletal muscle loss is negatively associated with single-pool Kt/V and dialysis duration in hemodialysis patients. *Therapeutic apheresis and dialysis: official peer-reviewed journal of the International Society for Apheresis, the Japanese Society for Apheresis, the Japanese Society for Dialysis Therapy*. 2014;18(6):612-7. Epub 2014/03/29. pmid:24674153.
 22. Morishita Y, Kubo K, Miki A, Ishibashi K, Kusano E, Nagata D. (2014). Positive association of vigorous and moderate physical activity volumes with skeletal muscle mass but not bone density or metabolism markers in hemodialysis patients. *International urology and nephrology*. 2014;46(3):633-9. Epub 2014/02/15. pmid:24526334.
 23. Ferrari M, Mottola L, Quaresima V. (2004). Principles, techniques, and limitations of near infrared spectroscopy. *Canadian journal of applied physiology = Revue canadienne de physiologie appliquee*. 2004;29(4):463-87. Epub 2004/08/27. pmid:15328595.
 24. Sperlich PF, Holmberg HC, Reed JL, Zinner C, Mester J, Sperlich B. (2015). Individual versus Standardized Running Protocols in the Determination of VO2max. *J Sports Sci Med*. 2015;14(2):386-93. Epub 2015/05/20. pmid:25983589; PubMed Central PMCID: PMC4424469.
 25. Astrand I. (1960). Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. *Acta Physiol Scand Suppl*. 1960;49(169):1-92. Epub 1960/01/01. pmid:13794892.
 26. Adami A, Sivieri A, Moia C, Perini R, Ferretti G. (2013). Effects of step duration in incremental ramp protocols on peak power and maximal oxygen consumption. *European journal of applied physiology*. 2013;113(10):2647-53. Epub 2013/08/21. pmid:23949790.
 27. Connes P, Hue O, Perrey S. (2010). *Exercise physiology: From a cellular to an integrative approach*: IOS Press.
 28. Lador F, Tam E, Adami A, Kenfack MA, Bringard A, Cautero M, et al. (2013). Cardiac output, O2 delivery and VO2 kinetics during step exercise in acute normobaric hypoxia. *Respir Physiol Neurobiol*. 2013;186(2):206-13. Epub 2013/02/19. pmid:23416403.
 29. Turner AP, Cathcart AJ, Parker ME, Butterworth C, Wilson J, Ward SA. (2006). Oxygen uptake and muscle desaturation kinetics during intermittent cycling. *Medicine and science in sports and exercise*. 2006;38(3):492-503. Epub 2006/03/17. pmid:16540837.
 30. Harris RC, Edwards RH, Hultman E, Nordesjo LO, Nyland B, Sahlin K. (1976). The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. *Pflugers Archiv: European journal of physiology*. 1976;367(2):137-42. Epub 1976/12/28. pmid:1034909.
 31. Tomlin DL, Wenger HA. (2001). The relationship between aerobic fitness and recovery from high intensity intermittent exercise.

- Sports medicine (Auckland, NZ)*. 2001;31(1):1-11. Epub 2001/02/24. pmid:11219498.
32. Borsheim E, Bahr R. (2003). Effect of exercise intensity, duration and mode on post-exercise oxygen consumption. *Sports medicine (Auckland, NZ)*. 2003;33(14):1037-60. Epub 2003/11/06. pmid:14599232.
 33. Pierpont GL, Voth EJ. (2004). Assessing autonomic function by analysis of heart rate recovery from exercise in healthy subjects. *The American journal of cardiology*. 2004;94(1):64-8. Epub 2004/06/29. pmid:15219511.
 34. Cole CR, Blackstone EH, Pashkow FJ, Snader CE, Lauer MS. (1999). Heart-rate recovery immediately after exercise as a predictor of mortality. *The New England journal of medicine*. 1999;341(18):1351-7. Epub 1999/10/28. pmid:10536127.
 35. Trevizani GA, Benchimol-Barbosa PR, Nadal J. (2012). Effects of age and aerobic fitness on heart rate recovery in adult men. *Arquivos brasileiros de cardiologia*. 2012;99(3):802-10. Epub 2012/07/28. pmid:22836359.
 36. Vicente-Campos D, Martin Lopez A, Nunez MJ, Lopez Chicharro J. (2014). Heart rate recovery normality data recorded in response to a maximal exercise test in physically active men. *European journal of applied physiology*. 2014;114(6):1123-8. Epub 2014/02/21. pmid:24553907.
 37. Daanen HA, Lamberts RP, Kallen VL, Jin A, Van Meeteren NL. (2012). A systematic review on heart-rate recovery to monitor changes in training status in athletes. *International journal of sports physiology and performance*. 2012;7(3):251-60. Epub 2012/02/24. pmid:22357753.
 38. Suzic Lazic J, Dekleva M, Soldatovic I, Leischik R, Suzic S, Radovanovic D, et al. (2017). Heart rate recovery in elite athletes: the impact of age and exercise capacity. *Clinical physiology and functional imaging*. 2017;37(2):117-23. Epub 2015/07/07. pmid:26147945.
 39. Buchheit M, Ufland P. (2011). Effect of endurance training on performance and muscle reoxygenation rate during repeated-sprint running. *European journal of applied physiology*. 2011;111(2):293-301. Epub 2010/09/28. pmid:20872150.
 40. Boushel R, Langberg H, Olesen J, Gonzales-Alonzo J, Bulow J, Kjaer M. (2001). Monitoring tissue oxygen availability with near infrared spectroscopy (NIRS) in health and disease. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*. 2001;11(4):213-22. Epub 2001/07/31. pmid:11476426.
 41. Holloszy JO, Coyle EF. (1984). Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *Journal of applied physiology: respiratory, environmental and exercise physiology*. 1984;56(4):831-8. Epub 1984/04/01. pmid:6373687.
 42. Hood DA. (2001). Invited Review: contractile activity-induced mitochondrial biogenesis in skeletal muscle. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md: 1985)*. 2001;90(3):1137-57. Epub 2001/02/22. pmid:11181630.
 43. Buchheit M, Abbiss CR, Peiffer JJ, Laursen PB. (2012). Performance and physiological responses during a sprint interval training session: relationships with muscle oxygenation and pulmonary oxygen uptake kinetics. *European journal of applied physiology*. 2012;112(2):767-79. Epub 2011/06/15. pmid:21667291.
 44. Ratel S, Bedu M, Hennegrave A, Dore E, Duche P. (2002). Effects of age and recovery duration on peak power output during repeated cycling sprints. *International journal of sports medicine*. 2002;23(6):397-402. Epub 2002/09/07. pmid:12215957.
 45. Zafeiridis A, Dalamitros A, Dipla K, Manou V, Galanis N, Kellis S. (2005). Recovery during high-intensity intermittent anaerobic exercise in boys, teens, and men. *Medicine and science in sports and exercise*. 2005;37(3):505-12. Epub 2005/03/03. pmid:15741851.
 46. Reaburn P, Dascombe B. (2008). Anaerobic performance in masters athletes. *European Review of Aging and Physical Activity*. 2008;6(1):39-53.
 47. Eriksson BO, Gollnick PD, Saltin B. (1973). Muscle metabolism and enzyme activities after training in boys 11-13 years old. *Acta physiologica Scandinavica*. 1973;87(4):485-97. Epub 1973/04/01. pmid:4269332.
 48. Kuno S, Takahashi H, Fujimoto K, Akima H, Miyamaru M, Nemoto I, et al. (1995). Muscle metabolism during exercise using phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy in adolescents. *European journal of applied physiology and occupational physiology*. 1995;70(4):301-4. Epub 1995/01/01. pmid:7649140.
 49. Taylor DJ, Kemp GJ, Thompson CH, Radda GK. (1997). Ageing: effects on oxidative function of skeletal muscle in vivo. *Molecular and cellular biochemistry*. 1997;174(1-2):321-4. Epub 1997/10/06. pmid:9309705.
 50. Zanonato S, Buchthal S, Barstow TJ, Cooper DM. (1993). 31P-magnetic resonance spectroscopy of leg muscle metabolism during exercise in children and adults. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md: 1985)*. 1993;74(5):2214-8. Epub 1993/05/01. pmid:8335550.
 51. Boisseau N, Delamarche P. (2000). Metabolic and hormonal responses to exercise in children and adolescents. *Sports medicine (Auckland, NZ)*. 2000;30(6):405-22. Epub 2000/12/29. pmid:11132123.
 52. Armstrong N, Barker AR, McManus AM. (2015). Muscle metabolism changes with age and maturation: How do they relate to youth sport performance? *British journal of sports medicine*. 2015;49(13):860-4. Epub 2015/05/06. pmid:25940635.
 53. Baker AB, Tang YQ, Turner MJ. (2003). Percentage decline in masters superathlete track and field performance with aging. *Experimental aging research*. 2003;29(1):47-65. Epub 2003/05/09. pmid:12735081.
 54. Benelli P, Ditroilo M, Forte R, De Vito G, Stocchi V. (2007). Assessment of post-competition peak blood lactate in male and female master swimmers aged 40-79 years and its relationship with swimming performance. *European journal of applied physiology*. 2007;99(6):685-93. Epub 2007/02/06. pmid:17277939.
 55. Fair RC. Estimated age effects in athletic events and chess. (2006). *Experimental aging research*. 2007;33(1):37-57. Epub 2006/11/30. pmid:17132563.
 56. Noakes TD. (2008). Testing for maximum oxygen consumption has produced a brainless model of human exercise performance. *British journal of sports medicine*. 2008;42(7):551-5. Epub 2008/04/22. pmid:18424484.
 57. Noakes TD. (2012). Fatigue is a Brain-Derived Emotion that Regulates the Exercise Behavior to Ensure the Protection of Whole Body Homeostasis. *Front Physiol*. 2012;3:82. Epub 2012/04/20. pmid:22514538; PubMed Central PMCID: PMC3323922.
 58. Crisafulli A, Carta C, Melis F, Tocco F, Frongia F, Santoboni UM, et al. (2004). Haemodynamic responses following intermittent supramaximal exercise in athletes. *Experimental physiology*. 2004;89(6):665-74. Epub 2004/08/26. pmid:15328308.
 59. Buchheit M, Cormie P, Abbiss CR, Ahmaidi S, Nosaka KK, Laursen PB. (2009). Muscle deoxygenation during repeated sprint

- running: Effect of active vs. *passive recovery*. *International journal of sports medicine*. 2009;30(6):418-25. Epub 2009/05/14. [pmid:19437381](#).
60. Haseler LJ, Hogan MC, Richardson RS. (1999). Skeletal muscle phosphocreatine recovery in exercise-trained humans is dependent on O₂ availability. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md: 1985)*. 1999;86(6):2013-8. Epub 1999/06/16. [pmid:10368368](#).
61. Dupont G, Blondel N, Berthoin S. (2003). Performance for short intermittent runs: active recovery vs. *passive recovery*. *European journal of applied physiology*. 2003;89(6):548-54. Epub 2003/05/08. [pmid:12734760](#).
62. van Beekvelt MC, Borghuis MS, van Engelen BG, Wevers RA, Colier WN. (2001). Adipose tissue thickness affects in vivo quantitative near-IR spectroscopy in human skeletal muscle. *Clinical science (London, England: 1979)*. 2001;101(1):21-8. Epub 2001/06/21. [pmid:11410110](#).
63. Mattu AT, Iannetta D, MacInnis MJ, Doyle-Baker PK, Murias JM. (2019). Menstrual and oral contraceptive cycle phases do not affect submaximal and maximal exercise responses. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*. 2019. Epub 2019/10/31. [pmid:31663173](#).
64. Iannetta D, Inglis EC, Mattu AT, Fontana FY, Pogliaghi S, Keir DA, et al. (2020). A Critical Evaluation of Current Methods for Exercise Prescription in Women and Men. *Medicine and science in sports and exercise*. 2020;52(2):466-73. Epub 2019/09/04. [pmid:31479001](#).
65. Hill DW, Poole DC, Smith JC. (2002). The relationship between power and the time to achieve. *VO(2max)*. *Medicine and science in sports and exercise*. 2002;34(4):709-14. Epub 2002/04/05. [pmid:11932583](#).

Cita Original

Chang S-C, Adami A, Lin H-C, Lin Y-C, Chen CPC, Fu T-C, et al. (2020) Relationship between maximal incremental and high-intensity interval exercise performance in elite athletes. *PLoS ONE* 15(5): e0226313. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226313>