

Article

Diferencias Fisiológicas entre Atletas Avanzados de Crossfit, Participantes Recreativos de Crossfit y Adultos Físicamente Activos

Gerald T. Mangine, Matthew T. Stratton, Christian G. Almeda, Michael D. Roberts, Tiffany A. Esmat, Trisha A. VanDusseldorp y Yuri Feito

Exercise Science and Sport Management, Kennesaw State University, Kennesaw, Georgia School of Kinesiology, Auburn University, Auburn, Alabama

RESUMEN

Esta investigación examinó las diferencias antropométricas, hormonales y fisiológicas entre participantes avanzados (ADV; $n = 8$, 27.8 ± 4.2 años, 170 ± 11 cm, 79.8 ± 13.3 kg) y recreativos (REC; $n = 8$, 33.5 ± 8.1 años, 172 ± 14 cm, 76.3 ± 19.5 kg) entrenados en CrossFit (CF) en comparación con controles físicamente activos (CON; $n = 7$, 27.5 ± 6.7 años, 171 ± 14 cm, 74.5 ± 14.3 kg). Los ADV y REC se distinguieron por su éxito competitivo pasado. Los REC y CON fueron entrenados en fuerza (>2 años) y se ejercitaban en 3-5 días/semana-1 durante el año pasado, pero el grupo CON utilizó ejercicio de fuerza tradicional y ejercicio cardiovascular. Todos los participantes proporcionaron una muestra de sangre en ayunas y en reposo y completaron las evaluaciones de la tasa metabólica de reposo, la composición corporal, la morfología muscular, la fuerza isométrica del tirón a mitad de muslo, la capacidad aeróbica máxima y un sprint en ciclo ergómetro máximo de 3 minutos en dos ocasiones separadas (separadas por 3-7 días). Se analizaron las muestras de sangre para determinar la testosterona, el cortisol y el factor I de crecimiento como la insulina. En comparación con REC y CON, el análisis de varianza unidireccional reveló que el grupo ADV posee un porcentaje de grasa corporal más bajo ($6.7-8.3\%$, $p = 0.007$), mayor masa magra ósea y no ósea ($12.5-26.8\%$, $p \leq 0.028$), características de morfología muscular ($14.2-59.9\%$, $p < 0.05$), características de fuerza isométrica ($15.4-41.8\%$, $p < 0.05$), capacidad aeróbica máxima ($18.8-19.1\%$, $p = 0.002$) y rendimiento de ciclismo de 3 minutos ($15.4-51.1\%$, $p \leq 0.023$). No se observaron diferencias entre REC y CON, o entre todos los grupos para la tasa metabólica en reposo o las concentraciones hormonales. Estos datos sugieren que los participantes ADV poseen varias ventajas fisiológicas sobre los grupos REC y CON, mientras que características fisiológicas similares estuvieron presentes en individuos que han estado participando regularmente en CF o entrenamiento de fuerza y cardiovascular durante el último año.

INTRODUCCIÓN

El CrossFit® (CF) es una forma de entrenamiento funcional de alta intensidad que combina ejercicios de fuerza, gimnasia y modalidades aeróbicas tradicionales (por ejemplo, ciclismo, remo, carrera) en sesiones de entrenamientos únicos que varían según el día para obtener una preparación física general [1,2]. Esta forma de entrenamiento es disfrutada recreativamente por participantes de diferentes niveles de condición física, experiencia de entrenamiento, edad y estilos de

vida [3] y también existe como un propio deporte. La principal competencia de CF son los *Reebok CrossFit Games™* (Juegos), que otorga a los ganadores individuales el título de "*Fittest on Earth™*". Históricamente, esta competencia ha consistido en varias etapas diseñadas para reducir el grupo inicial de participantes a los mejores atletas. Aunque la estructura de la competencia ha cambiado con el tiempo [4, 5], la presencia de una ronda inicial de clasificación *on-line* (por ejemplo, el *CrossFit Open™*) ha sido mantenida. Esta ronda generalmente involucra múltiples desafíos de entrenamiento que se completan en el transcurso de varias semanas. Los competidores que completen todos los entrenamientos y se clasifiquen lo suficientemente alto avanzarán a la siguiente etapa de la competencia. Independientemente de la etapa, se espera que cada entrenamiento consista en un conjunto de desafíos que requerirán una combinación de fuerza, potencia, resistencia y/o habilidad específica deportiva [1]. Sin embargo, se sabe poco acerca de las características fisiológicas de los competidores que progresan más allá de la ronda de apertura de la competencia.

La masa corporal [6], la fuerza y la potencia anaeróbica [6-10], la capacidad aeróbica [9], la habilidad deportiva específica [8,10] y la experiencia [9] se han asociado con el rendimiento del entrenamiento de CF o la clasificación competitiva. En conjunto, estos datos implican que los atletas deben entrenarse para ser competentes en cada una de ellas para desempeñarse bien en la competencia. Sin embargo, existen varias limitaciones entre estos estudios que impiden llegar a tal conclusión. Por ejemplo, Serafini y cols. (2018) informaron que los competidores de mayor rango del Abierto de 2016 fueron más fuertes, más potentes y más competentes en los entrenamientos de CF de tipo sprint de corta duración. Entre los competidores regionales, la clasificación final se relacionó positivamente con el tiempo de sprint de 400 m y el tiempo de finalización en entrenamientos de referencia más largos (es decir, *Filthy-50*) ($r = 0.69-0.77$), y negativamente relacionado con el peso máximo utilizado en los levantamientos olímpicos ($r = -0.39$ a -0.42) [10]. Aunque estos estudios incluyeron a participantes que tienen registros competitivos exitosos, las medidas utilizadas para distinguir el rango fueron todas autoinformadas. Como tal, la autenticidad y los datos reales de medición (los datos autoinformados se obtuvieron a partir de un recurso *on-line*) no se pueden verificar. Por el contrario, otros han medido una variedad de parámetros físicos y los han relacionado con entrenamientos de estilo CF realizados en un entorno controlado de laboratorio [6, 7, 9]. Si bien estos estudios también han incluido atletas exitosos de CF, los entrenamientos de laboratorio no emulan adecuadamente el entorno competitivo y pueden influir en la respuesta fisiológica al entrenamiento de CF [11-14]. Por lo tanto, quedan preguntas sobre las características distintivas de los atletas exitosos de CF.

En los deportes más tradicionales (por ej., fútbol, béisbol, baloncesto, etc.), es común identificar las características fisiológicas y deportivas claves que distinguen el rendimiento [15-18]. La práctica permite a los profesionales de la fuerza y el acondicionamiento desarrollar programas de entrenamiento específicos para el deporte, que son más efectivos para transferir adaptaciones al rendimiento en el juego. Sin embargo, el CF es único en que los trabajos de sesiones de entrenamiento típicos reflejan a los que aparecen en la competencia. Además, y de acuerdo con su propósito principal [1, 2], se ha documentado la participación crónica en el entrenamiento de CF para mejorar una variedad de parámetros del fitness físico [19]. Aunque podría suponerse que el entrenamiento de CF representa una estrategia de entrenamiento ideal para desarrollar las características fisiológicas presentes en competidores exitosos, tal conclusión sería prematura según los datos disponibles.

La evidencia de que el entrenamiento de CF es más ventajoso para desarrollar una variedad de resultados de acondicionamiento físico en comparación con estrategias de entrenamiento alternativas (por ejemplo, entrenamiento de la fuerza, entrenamiento por intervalos de alta intensidad) es equívoca [19-25]. Esto es probable porque la mayoría de los estudios de entrenamiento comparativo han utilizado participantes no entrenados o novatos (para el CF), lo cual es problemático porque no requieren un estímulo de entrenamiento muy específico o intenso para provocar adaptaciones en comparación con los ejercitantes experimentados [26]. Es posible que sea necesaria una mayor duración del entrenamiento o participantes más avanzados para observar las ventajas o desventajas de la estrategia de CF. Desafortunadamente, los competidores de élite rara vez comparten sus estrategias de entrenamiento y la evidencia anecdótica sugiere que incorporan más de lo que ocurre comúnmente durante una sesión típica de entrenamiento de CF. Hasta donde sabemos, sólo existe un estudio bien controlado donde se examinó una variedad de parámetros fisiológicos entre los participantes entrenados en CF y aquellos entrenados en modalidades de ejercicio más tradicionales (por ejemplo, entrenamiento de la fuerza) [27]. En esa investigación transversal, los hombres con al menos un año de experiencia en entrenamiento de CF superaron a sus homólogos entrenados en fuerza (>1 año) en una prueba de carrera de ida y vuelta de múltiples etapas y poseían una mayor capacidad aeróbica; todas las demás medidas fueron estadísticamente similares. Si bien este estudio proporciona evidencia a favor del entrenamiento de CF, no hubo requisitos de entrenamiento aeróbico para el grupo de entrenamiento de la fuerza, y la experiencia real del grupo de CF no fue clara más allá de haber participado en la estrategia durante al menos un año. Es posible que existan múltiples diferencias fisiológicas cuando se considera la experiencia. Por lo tanto, el propósito de este estudio fue examinar las diferencias antropométricas, hormonales y fisiológicas entre los atletas avanzados de CF, practicantes recreativos de CF y adultos físicamente activos que participan regularmente en el entrenamiento de fuerza y cardiovascular. Dado que las adaptaciones son específicas de la modalidad y el esfuerzo del entrenamiento [26], planteamos la hipótesis de que la composición corporal, la morfología muscular, el rendimiento aeróbico y anaeróbico y la fuerza, serían diferentes entre los grupos. Específicamente, los atletas avanzados de CF superarían a los otros grupos, mientras que los practicantes recreativos de CF y los adultos físicamente activos

serían similares. Sin embargo, debido a que las concentraciones hormonales en reposo generalmente no cambian a través del entrenamiento [14], se planteó la hipótesis de que serían similares entre los grupos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño experimental

Para este estudio transversal, los adultos físicamente activos fueron reclutados y asignados a grupos en función de su experiencia con el entrenamiento y el rendimiento del CF durante competencias específicas de CF. Los participantes que poseían experiencia en entrenamiento de CF (>2 años) fueron clasificados como avanzados (ADV), si previamente se habían clasificado para la ronda regional de la competencia de los Juegos. De lo contrario, se clasificaron como recreativos (REC) porque nunca habían progresado más allá de la ronda de apertura de la competencia (es decir, *The Open*), pero aún así entrenaban de 3 a 5 días por semana durante al menos el año anterior. Las personas que no poseían experiencia en el entrenamiento de CF pero poseían experiencia en el entrenamiento de la fuerza (>2 años) y participaban en el entrenamiento de la fuerza y cardiovascular en 3-5 días por semana durante al menos el año anterior, fueron asignadas al grupo de control físicamente activo (CON). Todos los participantes se reportaron al Laboratorio de Fisiología del Ejercicio en dos ocasiones separadas, dentro del mes siguiente al inicio del *Open*, para completar todas las pruebas. Durante la primera visita, cada participante proporcionó una muestra de sangre en ayunas antes de completar las evaluaciones de la morfología muscular y luego una prueba de ejercicio gradual para medir la capacidad aeróbica máxima. Los participantes regresaron al Laboratorio de Fisiología del Ejercicio para la segunda visita (dentro de los 3 a 7 días posteriores a la primera visita) para completar las evaluaciones de la tasa metabólica en reposo, la composición corporal y la fuerza antes de terminar el estudio con un test de ciclismo de 3 minutos. Todas las sesiones de prueba ocurrieron en la mañana (~6:00-10:00 a.m.), con los participantes que se abstuvieron de actividad física no acostumbrada y alcohol durante 24 horas, cafeína durante 12 horas y en ayunas durante 8 horas. Los participantes completaron todas las mediciones mientras usaban ropa deportiva cómoda y pudieron consumir un refrigerio ligero antes de las pruebas de rendimiento (es decir, capacidad aeróbica máxima, fuerza y rendimiento de ciclismo de 3 minutos). Antes de abandonar el laboratorio en la primera visita, se les pidió a los participantes que completaran un registro de dieta de 24 horas, conservaran una copia y siguieran una dieta similar antes de su segunda visita. Se hicieron comparaciones entre los grupos para todas las medidas antropométricas, bioquímicas y fisiológicas.

Participantes

El análisis *a priori* se basó en datos publicados [8, 28] y no publicados relacionados recopilados por nuestro laboratorio, donde se hicieron comparaciones entre niveles competitivos y rangos para medidas autoinformadas de fuerza y potencia en atletas de CF. Los tamaños del efecto producidos a partir de las comparaciones grupales (eta cuadrado parcial >0.485), alfa estándar ($p = 0.05$) y beta mínimo ($\beta = 0.80$) se introdujeron en el software estadístico (*G * Power*, v. 3.1.9.4, Heinrich-Heine -Universität, Alemania). Se determinó que se necesitaba un mínimo de 20 participantes para obtener una potencia suficiente para observar las diferencias entre sexos y grupos. En consecuencia, veintitrés adultos físicamente activos (29.7 ± 6.8 años, 171 ± 12 cm, 76.9 ± 15.4 kg) aceptaron participar en este estudio. Todos los participantes estaban libres de cualquier limitación física (determinada por el cuestionario de historial médico y de actividad física y PAR-Q+) y habían estado participando regularmente (en el momento del reclutamiento) en la forma de ejercicio elegida (es decir, entrenamiento CrossFit o entrenamiento de fuerza/cardiovascular) por un mínimo de 2 años. Los participantes en ADV ($n = 8$ [hombres = 4, mujeres = 4], 27.8 ± 4.2 años, 170 ± 11 cm, 79.8 ± 13.3 kg) informaron haber participado regularmente en entrenamiento de la fuerza durante 11.5 ± 5.8 años y entrenamiento de CF durante 6.4 ± 5.6 años (6-7 sesiones-semana-1). Como competidores individuales, el rango más alto que estos participantes alcanzaron en el *Open* fue $659^{\circ} \pm 991^{\circ}$ (rango: 19° - $3,052^{\circ}$) dentro de sus respectivas divisiones en todo el mundo. Si bien cada uno de estos atletas se clasificó para este estudio al haber competido como miembros de un equipo en la competencia regional (rango promedio más alto = $11^{\circ} \pm 13^{\circ}$) y juegos (rango promedio más alto = $20^{\circ} \pm 9^{\circ}$), tres compitieron individualmente en sus respectivas regiones con uno habiendo progresado a los Juegos en múltiples ocasiones. Los participantes de REC ($n = 8$ [hombres = 4, mujeres = 4], 33.5 ± 8.1 años, 172 ± 14 cm, 76.3 ± 19.5 kg) informaron haber participado regularmente en entrenamiento de la fuerza durante 8.1 ± 7.9 años y entrenamiento de CF durante 3.3 ± 1.7 años (4-5 sesiones-semana-1). El rango más alto que estos participantes alcanzaron en el *Open* fue $22,306^{\circ} \pm 14,028^{\circ}$ (rango: $5,466^{\circ}$ - $44,315^{\circ}$) dentro de sus respectivas divisiones a nivel mundial. Los participantes en CON ($n = 7$ [hombres = 4, mujeres = 3], 27.5 ± 6.7 años, 171 ± 14 cm, 74.5 ± 14.3 kg) informaron tener 7.6 ± 4.8 años de experiencia en entrenamiento de fuerza regular e incorporaron 3.7 ± 1.3 sesiones y 3.6 ± 1.0 sesiones de entrenamiento de la fuerza y cardiovascular por semana. Aunque dos participantes en CON informaron haber participado previamente en entrenamientos de estilo CF, estos no ocurrieron con regularidad (< 3 sesiones-semana-1) o por una duración prolongada (< 1 año) y nunca habían competido en el *Open* al momento de la recopilación de los datos. Después de una explicación de todos los procedimientos, riesgos y beneficios, cada participante

proporcionó su consentimiento informado por escrito para participar en el estudio. El estudio se realizó en conformidad con la Declaración de Helsinki, y el protocolo fue aprobado por la Junta de Revisión Institucional de la Universidad Estatal de Kennesaw (#17-501).

Muestras de sangre y análisis bioquímico.

Se obtuvieron muestras de sangre en la primera visita antes de cualquier actividad física. Todas las muestras fueron obtenidas de una vena antecubital usando una aguja por un miembro del equipo de investigación que estaba capacitado y tenía experiencia en flebotomía. Aproximadamente 15 ml de sangre se extrajeron en tubos SST (para recolección de suero) y tubos Vacutainer® tratados con EDTA (para plasma). Los tubos SST se dejaron coagular durante 10 minutos antes de la centrifugación, mientras que los tubos tratados con EDTA se centrifugaron inmediatamente durante 10 minutos a 3600 rpm a 4°C. El suero y el plasma resultantes se dividieron en alícuotas y se almacenaron a -80°C hasta el análisis.

Las concentraciones circulantes de testosterona (T; en ng·dL⁻¹), cortisol (C; en µg·dL⁻¹) y factor I de crecimiento como la insulina (IGF-1; en ng·mL⁻¹), se evaluaron mediante ensayos inmunosorbentes ligados a enzimas (ELISA) a través de un espectrofotómetro de 96-well (BioTek, Winooski, VT) utilizando kits disponibles en el mercado. Para eliminar la varianza entre los ensayos, todas las muestras para cada ensayo se descongelaron una vez y se analizaron por duplicado en el mismo ensayo realizado por un sólo técnico. Las muestras se analizaron por duplicado, con un coeficiente de variación promedio de 1.63% para T, 6.88% para C y 2.00% para IGF-1.

Morfología muscular

Se tomaron imágenes de ultrasonido del músculo esquelético no invasivas de las ubicaciones de los muslos y brazos derechos de todos los participantes. Antes de la recopilación de imágenes, todas las ubicaciones anatómicas de interés se identificaron utilizando puntos de referencia estandarizados para los músculos recto femoral (RF), vasto medial (VM), vasto lateral (VL), bíceps braquial (BB) y tríceps braquial (TB). Los puntos de referencia para la musculatura del muslo se identificaron a lo largo de la distancia longitudinal sobre el fémur. El RF y el VM se evaluaron respectivamente al 50% y 20% de la distancia desde el borde proximal de la rótula hasta la cresta suprailíaca inferior anterior. El VL se evaluó al 50% de la distancia desde el cóndilo lateral de la tibia hasta el punto más prominente del trocánter mayor del fémur. La medición del VL requiere que el participante se acueste de costado. La identificación básica del BB y del TB requiere que el participante se sienta en la mesa de examen y extendía el brazo para descansar sobre el hombro del investigador. Ambos músculos se evaluaron a lo largo del húmero en una posición igual al 40% de la distancia desde el epicóndilo lateral a la apófisis acromion de la escápula [29]. Posteriormente, el participante luego reposó en decúbito supino en la mesa de examen durante un mínimo de 5 a 10 minutos para permitir que ocurrieran cambios de líquidos antes de que se recogieran las imágenes [30]. El mismo investigador realizó todas las mediciones básicas para cada participante.

Un cabezal de exploración de sonda lineal de 12 MHz (General Electric LOGIQ S7 Expert, Wauwatosa, WI, EE. UU.) fue recubierto con gel de transmisión soluble en agua para optimizar la resolución espacial y se usó para recolectar todas las imágenes de ultrasonido. La recolección de cada imagen comenzó con la sonda posicionada (y perpendicular a) la superficie de la piel para proporcionar un contacto acústico sin presionar la capa dérmica. Posteriormente, se recogieron dos imágenes consecutivas en el modo de campo de visión extendido (Ganancia = 50 dB; Profundidad de imagen = 5-6 cm) utilizando un barrido transversal en el plano axial para capturar imágenes panorámicas de cada músculo. En los mismos sitios, se recogieron dos imágenes consecutivas con la sonda orientada longitudinalmente a la interfaz del tejido muscular utilizando ultrasonido en modo de brillo (modo B) [31]. Cada una de estas imágenes incluía una línea horizontal (aproximadamente 1 cm), ubicada debajo de la imagen, que se utilizó para fines de calibración al analizar las imágenes sin conexión [32]. Para capturar imágenes del RF y del VM, el participante permaneció en posición supina, con las piernas extendidas pero relajadas. Se colocó una toalla enrollada debajo de la fosa poplítea de la pierna dominante, lo que permitió una flexión de 10° en la rodilla medida por un goniómetro, y el pie dominante fue asegurado [33]. Para el VL, el participante se colocó de costado con las piernas juntas y la toalla enrollada entre sus rodillas. Una vez más, las piernas se colocaron para permitir una flexión de 10° en las rodillas, según lo medido por un goniómetro [33]. La medición del BB y del TB requirió que el participante se sentara derecho con el brazo extendido y descansando sobre el hombro del investigador. El mismo investigador posicionó a cada participante y recolectó todas las imágenes.

Después de que se recopilaron todas las imágenes, el mismo técnico transfirió los datos del ultrasonido a una computadora personal para su análisis vía *ImageJ* (National Institutes of Health, Bethesda, MD, EE. UU., Versión 1.45s). Todas las imágenes panorámicas se utilizaron para medir el área de sección transversal (CSA) y la intensidad del eco. Para estas medidas, se utilizó la herramienta de seguimiento de polígonos con el software *ImageJ* para aislar la mayor cantidad de músculo magro posible sin ningún hueso o fascia circundante [31]. Posteriormente, el software *ImageJ* calculó el área contenida dentro de la imagen muscular trazada e informó este valor en centímetros cuadrados (± 0.1 cm²). Al mismo tiempo, la intensidad del eco se determinó mediante análisis en escala de grises utilizando la función de histograma estándar en *ImageJ* [31] y se expresó como un valor de unidad arbitraria (*au*) entre 0-255 (0: negro; 255: blanco) con

valores más bajos que reflejan más tejido contráctil dentro cada músculo [31, 34]. Los valores medios de intensidad del eco se corrigieron por el grosor de la grasa subcutánea (SFT; promediado a partir de los valores de SFT obtenidos en los sitios medial, de la línea media y lateral de cada músculo) utilizando la ecuación 1 [35]. Todas las imágenes en modo B se utilizaron para medir el grosor muscular (± 0.01 cm; distancia perpendicular entre las aponeurosis superficiales y profundas) y el ángulo de pinación ($\pm 0.1^\circ$; intersección de los fascículos con la aponeurosis profunda). La longitud del fascículo (FL, ± 0.1 cm) a través de las aponeurosis profundas y superficiales se estimó a partir del grosor muscular y el ángulo de pinación utilizando la ecuación 2. Los coeficientes de correlación de intraclass (ICC3, $k = 0.77-0.99$) para determinar el grosor muscular, el ángulo de pinación, el CSA y la intensidad del eco fueron determinados previamente en diez hombres activos, entrenados en fuerza (25.3 ± 2.0 años, 180 ± 7 cm, 90.8 ± 6.8 kg) utilizando la metodología descrita anteriormente. La metodología para la determinación de la FL tiene un coeficiente de variación estimado del 4,7% [36].

Intensidad de eco corregida (EI) = Intensidad de eco sin procesar + (SFTx40.5278) **Eq 1**

Longitud del fascículo = grosor muscular · sen (ángulo de pinación)-1 **Eq 2**

Test de ejercicio graduado

La capacidad aeróbica máxima (VO_{2pico} ; $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$), umbral de compensación respiratoria (ECA; $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) y umbral de intercambio gaseoso (GET; $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) se evaluaron utilizando un protocolo continuo de ejercicio en rampa realizado en un cicloergómetro con freno electromagnético (Lode Excalibur Sport, Lode., BV, Groningen, Países Bajos). Antes de la prueba, cada participante realizó un calentamiento estandarizado que consistió en pedalear en el cicloergómetro durante 5 minutos con resistencia y cadencia preferidas por el participante, seguido de 10 sentadillas con peso corporal, 10 estocadas alternadas, 10 abrazos de rodillas caminando y 10 patadas de glúteos caminando. A los participantes se les permitió continuar su calentamiento con cualquier práctica adicional que los ayudara a sentirse cómodos al ingresar a la prueba. Los participantes fueron equipados con un monitor de frecuencia cardíaca (FC) (Team2, Polar, Lake Success, NY), un clip nasal y una máscara de válvula de 2 vías conectadas a un sistema de medición metabólica (True One 2400, ParvoMedics Inc., Salt Lake Ciudad, UT) para medir los gases espirados. La altura del asiento del cicloergómetro y la distancia del manubrio se ajustaron a la comodidad del participante. Inicialmente, los participantes completaron un período de calentamiento de 3 minutos con una resistencia establecida en 50W antes de comenzar la prueba a 75W. Durante la prueba, se les pidió a los participantes que mantuvieran una velocidad de pedaleo autoseleccionada (>50 rpm) mientras la potencia se aumentaba en 25W cada minuto hasta que la fatiga volitiva o la velocidad de pedaleo caían por debajo de 50 rpm durante más de 15 segundos. Al finalizar la prueba, cada participante progresó inmediatamente a un período de recuperación activa de 3 minutos en el que continuaron pedaleando a su propia cadencia contra una carga de 50W. La FC se evaluó en cada minuto del período de recuperación de 3 minutos. Luego los participantes descendían del cicloergómetro y se les pidió que descansaran en una silla durante dos minutos adicionales.

Los valores relativos de consumo de oxígeno (es decir, $VO_2 \cdot kg^{-1}$) recogidos en cada respiración se promediaron utilizando la técnica de promedio de 11 respiraciones [37] y se usaron para determinar el valor más alto alcanzado durante la prueba (es decir, el VO_{2pico}). El ECA, también conocido como el segundo umbral ventilatorio, se identificó como el valor de VO_2 en el cual el aumento en la relación ventilación- VO_2 estaba acompañada por un aumento en las relaciones ventilación- VCO_2 [38]. El GET se determinó utilizando el método de curva en V descrito por Beaver y cols. [39] El GET se definió como el valor de VO_2 correspondiente a la intersección de dos líneas de regresión lineal derivadas por separado de los puntos de datos por debajo y por encima del punto de ruptura en el CO_2 producido (VCO_2) versus la relación del VO_2 [40].

Registro dietético

Se realizó un seguimiento de la ingesta alimentaria de los participantes durante un período de 24 horas anterior a cada visita a través de un formulario de registro de alimentos dietéticos. Todos los participantes recibieron instrucciones sobre cómo registrar adecuadamente sus alimentos, bocadillos y bebidas a través de un formulario en papel. Específicamente, después de su inscripción en su primera visita, se les pidió a los participantes que registraran su ingesta de alimentos (desayuno, almuerzo, cena, bebidas y refrigerios) durante las 24 horas anteriores. Antes de abandonar el laboratorio en la primera visita, los participantes recibieron una copia de su formulario de registro de alimentos y se les pidió que consumieran una dieta similar durante las 24 horas previas a su segunda visita. Cada formulario fue inspeccionado visualmente para confirmar el cumplimiento de la dieta.

Determinación del ritmo metabólico de reposo

La evaluación de la tasa metabólica de reposo (RMR, $kcal \cdot día^{-1}$) se realizó en una habitación tranquila con una iluminación mínima (por ejemplo, sólo luz de la máquina de RMR) ubicada dentro del Laboratorio de Fisiología del Ejercicio. Antes de su llegada, los participantes fueron informados de todas las pautas previas a la prueba según lo descrito por Compher y cols. [41]. Estos incluyen: 1) evitar el consumo de alcohol 24 horas antes de la prueba, 2) no ingerir alimentos ni cafeína 8 y 12 horas antes de la prueba, respectivamente, y 3) suspender la actividad física no acostumbrada

24 horas antes de la prueba. La tasa metabólica de reposo se midió mediante un sistema de medición metabólica (Parvo Medics TrueOne 2400, ParvoMedics Inc., Salt Lake City, UT) utilizando una campana ventilada. Se pidió a los participantes que descansaran en posición supina con la campana ventilada colocada sobre su cara y cuello durante un máximo de 30 minutos. La determinación del RMR se basó en un intervalo de 5 minutos de volumen de consumo de oxígeno (VO₂) medido con un coeficiente de variación inferior al 10% [41]. El coeficiente de variación promedio fue de 6.36%.

Determinaciones de la composición corporal

Inicialmente, la altura (± 0.1 cm) y la masa corporal (± 0.1 kg) se determinaron utilizando un estadiómetro (WB-3000, TANITA Corporation, Tokio, Japón) con los participantes de pie descalzos, con los pies juntos, en su atuendo diario normal. Posteriormente, la composición corporal se evaluó mediante tres métodos comunes (es decir, absorciometría de rayos X de energía dual [iDXA, Lunar Corporation, Madison, WI], pletismografía de desplazamiento de aire [BodPod, COSMED USA Inc., Chicago, IL] y análisis de impedancia bioeléctrica [770 Body Composition and Body Water Analyzer, InBody, Seúl, Corea del Sur]) utilizando procedimientos estandarizados. Brevemente, el escaneo por iDXA requirió que los participantes se quitaran cualquier metal o joyería y se pusieran en posición supina sobre la mesa de la iDXA antes de un escaneo de todo el cuerpo en modo "estándar" utilizando los procedimientos recomendados por la compañía y los algoritmos suministrados. El aseguramiento de la calidad se evaluó mediante calibraciones diarias realizadas antes de todos los escaneos utilizando un bloque de calibración proporcionado por el fabricante. Todas las mediciones de iDXA fueron realizadas por el mismo investigador utilizando procedimientos estandarizados del posicionamiento del sujeto. Para la pletismografía por desplazamiento de aire, el dispositivo y la escala asociada se calibraron diariamente utilizando un volumen y una masa conocidos proporcionados por el fabricante. Durante las pruebas, se les pidió a los participantes que usaran un traje de baño ajustado o pantalones cortos de compresión y gorro de baño antes de ingresar al dispositivo. Se realizaron dos ensayos para cada participante para obtener dos mediciones del volumen corporal dentro de 150 ml. Se realizaba un tercer ensayo si las estimaciones del volumen corporal de los dos primeros ensayos no estaban dentro de 150 ml, y se promediaron los valores de los dos ensayos más cercanos. Se estimó el volumen torácico pulmonar [42]. El análisis de impedancia bioeléctrica requería que los participantes se pararan descalzos sobre dos sensores metálicos ubicados en la base del dispositivo y sostengan dos agarraderas durante aproximadamente 30-60 segundos. Antes de pisar el dispositivo, los participantes se limpiaron las plantas de los pies con toallitas con alcohol proporcionadas por el fabricante.

Después de las pruebas, la masa corporal, el contenido mineral óseo (BMC; a partir de la iDXA), el volumen corporal (de BodPod) y el agua corporal total (del análisis de impedancia bioeléctrica) se ingresaron en un modelo de 4 compartimentos, la Eq. 3 para estimar el porcentaje de grasa corporal (BF%) [43], masa grasa (± 0.1 kg) y masa sin grasa (± 0.1 kg). Estos valores, junto con las estimaciones regionales (brazos [suma de cada brazo], piernas [suma de cada pierna] y tronco [suma de la columna vertebral y la pelvis]) del contenido mineral óseo (± 0.1 kg) y la masa magra no ósea (± 0.1 kg) obtenidos a partir de la iDXA después de la demarcación manual de estas regiones de interés se utilizaron para todas las comparaciones de grupos. Los coeficientes de correlación de intraclase (ICC_{3,1} = 0.74-0.99) para determinar manualmente las estimaciones regionales del contenido mineral óseo y la masa magra no ósea se habían encontrado previamente en 10 adultos sanos, físicamente activos (25.1 \pm 2.4 años; 176 \pm 7 cm, 81.1 \pm 18.5 kg).

$$BF\% = \frac{(2.748 \times \text{volume}) - (0.699 \times \text{water}) + (1.129 \times \text{BMC}) - (2.051 \times \text{Body Mass})}{\text{Body Mass}} \times 100$$

Eq 3

Determinación de la fuerza

Después de las evaluaciones del RMR y la composición corporal, la fuerza se evaluó mediante una prueba isométrica de tirón a mitad del muslo. Antes de la prueba, cada participante completó el mismo calentamiento estandarizado descrito para la primera visita (es decir, 5 minutos de pedaleo, estiramiento dinámico, prácticas de calentamiento adicionales autoseleccionadas) seguido de un protocolo específico para el test de tirón isométrico a mitad del muslo. El componente específico incluyó tres esfuerzos isométricos en una barra inmovilizada posicionada aproximadamente en la mitad del muslo usando una intensidad percibida de 50, 70 y 90% del esfuerzo máximo, intercalada con una recuperación de un minuto. El calentamiento específico y la prueba isométrica de tirón a mitad del muslo se completaron dentro de un 'rack' de potencia (Rogue Fitness, Columbus, OH) mientras se paraban sobre una plataforma de fuerza portátil (Accupower, AMTI, Watertown, MA). Mientras estaba de pie sobre la placa de fuerza, se determinó la posición del medio muslo para cada participante antes de la prueba marcando la distancia del punto medio entre las articulaciones de la rodilla y la cadera. Se instruyó a cada participante para que asumiera su posición preferida del segundo tirón del 'power-clean' seleccionando sus ángulos de cadera y rodilla. La altura de la barra se ajustó a una posición aproximadamente igual (± 2.54 cm) a la mitad del muslo. Luego se les pidió a los participantes que usaran un agarre de enganche sobre la barra. El agarre de gancho se seleccionó para esta prueba porque todos los participantes informaron haber tenido experiencia con la

técnica y se usa comúnmente entre los atletas de CF durante la competencia. A los participantes también se les permitió envolver sus pulgares con cinta de entrenamiento deportivo y usar polvo. A la señal del investigador de "3, 2, 1, ¡GO!", los participantes recibieron instrucciones de tirar de la barra hacia arriba lo más fuerte y rápido posible y continuar su esfuerzo máximo durante 6 segundos. Todos los participantes recibieron instrucciones de relajarse antes del comando "¡GO!" para evitar la precontracción y se les asignaron tres intentos máximos. La plataforma de fuerza portátil midió la fuerza de reacción del suelo, impuesta sobre la plataforma por el participante, mientras tiraba de la barra. La producción de fuerza pico (F; en N), desarrollo de la velocidad pico y promedio (RFDPEAK, RFD AVG; en N·s⁻¹), y F y RFD a través de bandas de tiempo específicas (es decir, 0-30, 0-50, 0-90, 0-100, 0-150, 0-200 y 0-250 milisegundos) se calcularon posteriormente, como se describió anteriormente [44].

Test de pedaleo máximo de 3 minutos

Después de la evaluación de la fuerza, se evaluó el rendimiento durante un sprint máximo de 3 minutos en un cicloergómetro con freno electromagnético (Lode Excalibur Sport, Lode., B.V., Groningen, Países Bajos). Antes de la prueba, la altura del asiento y las posiciones del manubrio se ajustaron para reflejar sus posiciones durante la prueba de capacidad aeróbica máxima, y se les proporcionó a los participantes un tiempo (~3-5 minutos) para aclimatarse al cicloergómetro. Luego se asignó un período de descanso de 5 minutos antes de iniciar el protocolo de prueba, que se ha descrito previamente en detalle en otra parte [45]. Brevemente, la prueba comenzó con un período de referencia de 1 minuto que involucró 55 segundos de ciclos sin carga a 90 rpm y luego se aceleró hasta aproximadamente 110 rpm en los últimos 5 segundos del minuto. El protocolo pasó inmediatamente al período de prueba de 3 minutos en el que los participantes intentaban mantener la cadencia lo más alta posible en su totalidad. La resistencia para la prueba se estableció utilizando el modo lineal del cicloergómetro (factor lineal = potencia/[cadencia preferida]²). Es decir, el factor lineal se calculó como la potencia a medio camino entre el pico del VO₂ y el GET, dividido por la cadencia preferida de ciclistas no entrenados (70 rpm²) [46-48]. Para evitar el ritmo y garantizar un esfuerzo total, no se le informaba a los participantes sobre el tiempo transcurrido y se proporcionaba un fuerte estímulo verbal. Después de 3 minutos, los participantes progresaron a una etapa de recuperación de 3 minutos a 50W a su cadencia preferida. La potencia pico (± 1 W), la potencia crítica (CP; potencia promedio durante los últimos 30 segundos de la prueba; ± 1 W) [47] y la capacidad de trabajo anaeróbico (AWC; trabajo realizado por encima de la CP; (± 0.1 kJ) (48), se calcularon en función del rendimiento durante la prueba de sprint de 3 minutos.

Análisis estadístico

Los datos se modelaron utilizando un enfoque frecuentista y Bayesiano. El enfoque frecuentista incluyó un análisis de varianza (ANOVA) de dos extremos y dos vías (Grupo x Sexo) para cada variable dependiente. Como no se observaron diferencias entre los grupos, la edad no se incluyó en el modelo como factor adicional o covariable. Los supuestos de normalidad e igual varianza fueron verificados por las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Las interacciones significativas y los efectos principales se examinaron más a fondo utilizando el análisis *post-hoc* de Tukey. El criterio alfa se estableció en $p \leq 0.05$. Para evaluar aún más la probabilidad (o el efecto del grupo y/o sexo) de los datos bajo la hipótesis alternativa en comparación con la hipótesis nula, se realizó un ANOVA bayesiano bidireccional con escalas previas predeterminadas [49]. La probabilidad se representó en forma de factores de Bayes (es decir, BF₁₀) y se interpretaron de acuerdo con las recomendaciones de Wagenmakers y cols. [50]. Es decir, los datos se interpretaron como evidencia a favor de la hipótesis nula cuando BF₁₀ < 1. De lo contrario, se interpretó como "anecdóticamente" (1 < BF₁₀ < 3), "moderadamente" (3 < BF₁₀ < 10), "fuertemente" (10 < BF₁₀ < 30), "muy fuertemente" (30 < BF₁₀ < 100), o "extremadamente" (BF₁₀ > 100) a favor de la hipótesis alternativa. Todos los análisis estadísticos se realizaron con JASP 0.10.2 (Amsterdam, Países Bajos). Todos los datos se informan como media \pm desviación estándar.

RESULTADOS

Concentraciones hormonales de reposo

No se observaron interacciones para T, C, IGF-1. Sin embargo, se observó una tendencia para una interacción (F = 2.87, p = 0.090) impulsada por un efecto principal del sexo para la T (F = 6.11, p = 0.027) con diferencias anecdóticas entre sexos siendo 2.058 veces más probables en comparación con la hipótesis nula. Específicamente, las mujeres en ADV tendieron a exhibir concentraciones de T más bajas (p = 0.083) que los hombres en ADV. Las concentraciones de hormonas masculinas y femeninas se ilustran en la Figura 1.

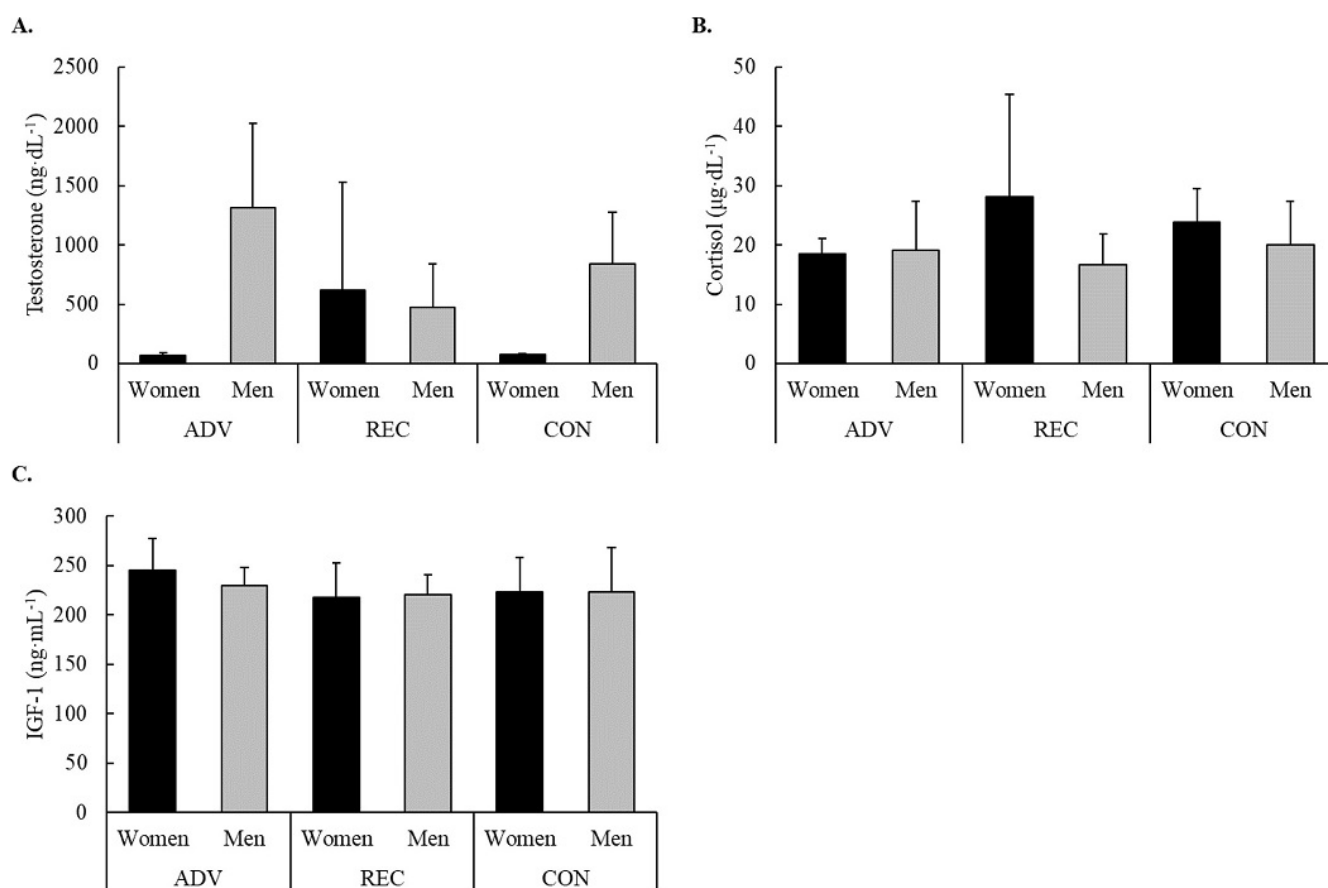


Figura 1. Concentraciones de reposo masculinas y femeninas en A) testosterona, B) cortisol y C) IGF-1. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223548.g001>

Morfología muscular

Las medidas de morfología muscular para cada grupo y sexo se presentan en la Tabla 1. Se observaron interacciones significativas ($p < 0.05$) de grupo x sexo para la longitud del fascículo y de la EI del BB para cada músculo, aunque la probabilidad de estas interacciones favoreció las hipótesis nulas ($BF_{10} < 1$). Por el contrario, las interacciones observadas fueron impulsadas principalmente por evidencia anecdótica a fuerte ($1.7 < BF_{10} < 30.0$) de los principales efectos para el sexo y el grupo. La interacción observada para la longitud del fascículo BB se debió principalmente a un efecto principal para el sexo donde las mujeres tenían 8.8 veces más probabilidades de poseer fascículos más cortos que los hombres, específicamente las mujeres del grupo REC en comparación con los hombres del mismo grupo REC ($p = 0.029$) y CON ($p = 0.012$). Aunque las causas subyacentes de las interacciones observadas para la EI variaron con cada músculo, la evidencia anecdótica a moderada indicó que los hombres tenían 1.7 a 5.5 veces más probabilidades de poseer una EI más baja que las mujeres. Específicamente, las mujeres en REC poseían una EI más alta ($p < 0.05$) que los hombres en ADV (RF, VL y TB; una tendencia [$p = 0.056$] para el VM) y REC (RF, VM, VL y TB; una tendencia [$p = 0.087$] se observó para el BB), y tendió ($p < 0.10$) a ser más alto que los hombres en CON (RF, VL y TB). Aunque no se observó un efecto principal, el efecto de grupo fue 2.4-30.0 veces más probable que influya en la EI. Específicamente, el análisis *post-hoc* de la interacción mostró que las mujeres en REC poseían una EI más alta que sus contrapartes en ADV (RF, VM, VL y TB).

Tabla 1. Medidas de morfología muscular por grupo y sexo.

		ADV		REC		CON		Group		Sex		Group x Sex	
		Women	Men	Women	Men	Women	Men	p	BF ₁₀	p	BF ₁₀	p	BF ₁₀
Muscle thickness (cm)	Rectus femoris	2.48 ± 0.36	3.28 ± 0.50	2.32 ± 0.27	2.86 ± 0.20	2.46 ± 0.25	2.61 ± 0.43	0.155	8.2	0.004	6.7	0.248	0.5
	Vastus medialis	3.44 ± 0.84	4.35 ± 0.58	2.77 ± 0.08	4.28 ± 0.61	3.41 ± 0.62	4.26 ± 0.22	0.439	>100	0.001	39.8	0.502	0.3
	Vastus lateralis	1.92 ± 0.49	2.47 ± 0.39	1.49 ± 0.25	1.97 ± 0.19	1.63 ± 0.19	1.67 ± 0.28	0.009	11.9	0.017	7.9	0.288	1.7
	Biceps brachii	3.32 ± 0.60	4.29 ± 0.87	2.62 ± 0.19	3.74 ± 0.71	2.43 ± 0.08	3.31 ± 0.17	0.013	>100	0.001	40.6	0.910	1.3
	Triceps brachii	2.51 ± 0.45	3.05 ± 0.76	2.44 ± 0.64	2.91 ± 0.58	1.98 ± 0.24	3.05 ± 0.43	0.674	7.1	0.008	2.1	0.541	0.3
Pennation angle (°)	Rectus femoris	12.7 ± 3.5	15.5 ± 0.5	10.0 ± 3.0	14.5 ± 1.2	13.3 ± 5.6	16.4 ± 5.5	0.375	2.9	0.036	1.4	0.894	0.5
	Vastus medialis	19.2 ± 3.9	26.2 ± 9.3	17.2 ± 3.4	24.9 ± 6.0	27.7 ± 10.8	24.0 ± 3.5	0.417	0.7	0.216	0.4	0.229	0.2
	Vastus lateralis	14.3 ± 3.1	14.8 ± 2.9	10.7 ± 3.4	12.4 ± 5.8	12.3 ± 0.4	13.2 ± 3.5	0.286	0.6	0.502	0.5	0.947	0.1
	Biceps brachii	13.6 ± 3.1	17.5 ± 2.2	12.8 ± 2.1	12.3 ± 5.0	10.5 ± 2.2	9.7 ± 1.5	0.009	7.0	0.489	3.2	0.249	0.4
	Triceps brachii	17.9 ± 5.1	26.8 ± 7.8	11.1 ± 3.2	16.8 ± 4.5	14.2 ± 2.6	20.3 ± 4.1	0.012	34.5	0.004	13.8	0.791	2.4
Fascicle length (cm)	Rectus femoris	12.2 ± 5.1	12.3 ± 2.2	14.1 ± 3.8	11.5 ± 0.8	12.8 ± 7.6	10.3 ± 4.5	0.852	0.6	0.365	0.3	0.786	0.1
	Vastus medialis	10.6 ± 2.4	11.2 ± 4.8	9.6 ± 1.8	10.6 ± 2.7	7.9 ± 2.4	10.6 ± 1.1	0.552	0.6	0.280	0.3	0.758	0.1
	Vastus lateralis	7.7 ± 0.4	9.9 ± 2.1	8.3 ± 1.5	10.5 ± 4.6	7.6 ± 0.6	7.7 ± 2.2	0.399	0.8	0.163	0.4	0.643	0.2
	Biceps brachii	14.5 ± 2.8	14.2 ± 1.3	12.0 ± 1.1 ^{df}	19.0 ± 4.8 ^c	13.8 ± 2.8	19.9 ± 2.7 ^c	0.271	9.8	0.002	8.8	0.043	0.5
	Triceps brachii	8.7 ± 2.8	7.3 ± 2.9	12.8 ± 1.7	10.5 ± 3.1	8.2 ± 0.9	9.1 ± 2.2	0.018	4.3	0.370	2.4	0.448	0.5
Cross-sectional area (cm ²)	Rectus femoris	10.8 ± 2.4	17.8 ± 3.3	8.8 ± 1.5	15.6 ± 1.8	11.2 ± 1.3	15.0 ± 2.8	0.216	>100	0.000	>100	0.364	0.4
	Vastus medialis	24.3 ± 6.6	29.8 ± 4	17.0 ± 3.9	27.8 ± 6.4	18.2 ± 2.1	23.7 ± 1.2	0.046	22.3	0.002	12.0	0.441	0.8
	Vastus lateralis	29.8 ± 4.1	44.9 ± 4.1	24.4 ± 2.6	38.2 ± 4.5	24.1 ± 1.7	37.9 ± 3.0	0.004	>100	0.001	>100	0.912	0.5
	Biceps brachii	8.4 ± 1.7	17.7 ± 9.2	7.4 ± 2.0	14.9 ± 2.5	7.9 ± 0.2	12.9 ± 1.0	0.464	77.5	0.001	32.6	0.622	0.3
	Triceps brachii	10.5 ± 1.2	18 ± 4.3	7.0 ± 1.4	17.0 ± 5.7	8.9 ± 1.4	14.0 ± 3.6	0.273	>100	0.000	>100	0.417	0.3
Echo intensity (au)	Rectus femoris	116 ± 26 ^c	113 ± 11 ^c	174 ± 33 ^{abd}	97 ± 14 ^{ce}	151 ± 16 ^d	129 ± 14	0.061	30.0	0.001	5.5	0.008	0.6
	Vastus medialis	105 ± 16 ^c	108 ± 11	153 ± 39 ^{ad}	104 ± 12 ^c	116 ± 11	134 ± 13	0.093	2.4	0.289	0.8	0.012	0.4
	Vastus lateralis	111 ± 20 ^c	113 ± 15 ^c	171 ± 42 ^{abd}	107 ± 19 ^c	134 ± 16	123 ± 10	0.087	4.3	0.023	1.7	0.028	0.7
	Biceps brachii	123 ± 26	140 ± 9	170 ± 45	115 ± 29	148 ± 9	142 ± 17	0.585	0.6	0.206	0.5	0.044	0.2
	Triceps brachii	83 ± 17 ^c	89 ± 18 ^c	145 ± 43 ^{abd}	78 ± 13 ^c	114 ± 16	100 ± 6	0.079	7.2	0.014	1.8	0.012	0.6

^a = Significantly ($p < 0.05$) different from ADV women

^b = Significantly ($p < 0.05$) different from ADV men

^c = Significantly ($p < 0.05$) different from REC women

^d = Significantly ($p < 0.05$) different from REC men

^e = Significantly ($p < 0.05$) different from CON women

^f = Significantly ($p < 0.05$) different from CON men.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223548.t001>

Se encontraron efectos grupales significativos para el grosor muscular (VL y BB), ángulo de pinación (BB y TB), longitud fascicular de TB y CSA (VM y VL). En comparación con CON, el grupo ADV poseía un mayor grosor muscular en VL ($p = 0.013$, $BF_{10} = 3.0$) y en BB ($p = 0.012$, $BF_{10} = 2.2$), mayor ángulo de pinación en BB ($p = 0.007$, $BF_{10} = 21.9$), y mayor CSA en VM ($p = 0.050$, $BF_{10} = 2.1$) y en VL ($p = 0.009$, $BF_{10} = 0.7$). En comparación con REC, el grupo ADV poseía un mayor grosor muscular en el VL ($p = 0.026$, $BF_{10} = 1.9$), mayor ángulo de pinación en TB ($p = 0.009$, $BF_{10} = 3.2$), fascículos más largos en TB ($p = 0.019$, $BF_{10} = 3.9$), y mayor CSA en VL ($p = 0.009$, $BF_{10} = 0.8$); También se observó una tendencia a un mayor grosor muscular en el BB para ADV en comparación con REC ($p = 0.086$, $BF_{10} = 0.9$). No se observaron diferencias entre REC y CON. Las comparaciones morfológicas se presentan en la Tabla 1.

Test de ejercicio graduado

No se observaron interacciones significativas entre grupo y sexo para el VO_{2pico} ($F = 1.09$, $p = 0.358$, $BF_{10} = 10.1$), el RCT ($F = 0.32$, $p = 0.730$, $BF_{10} = 1.7$), o el GET ($F = 0.05$, $p = 0.949$, $BF_{10} = 1.1$). Sin embargo, se encontraron pruebas de moderadas a fuertes a favor de los efectos de grupo principal para cada variable. El VO_{2pico} ($F = 9.10$, $p = 0.002$, $BF_{10} = 17.0$) y el RCT ($F = 5.56$, $p = 0.014$, $BF_{10} = 4.5$) fueron significativamente mayores en ADV en comparación con REC ($p \leq 0.039$) y CON ($p \leq 0.020$), mientras que el GET ($F = 5.29$, $p = 0.016$, $BF_{10} = 5.7$) fue significativamente mayor en ADV en comparación con CON ($p = 0.016$) y tendió a ser mayor en comparación con REC ($p = 0.087$). No se observaron diferencias entre los grupos REC y CON. Además, el porcentaje del VO_{2pico} para GET y RCT fue similar entre ADV (GET = $55.2 \pm 11.2\%$; RCT = $71.7 \pm 7.5\%$), REC (GET = $55.9 \pm 6.8\%$; RCT = $73.5 \pm 5.9\%$) y CON (GET = $53.9 \pm 4.3\%$; ECA = $74.6 \pm 7.7\%$). Las diferencias grupales en las medidas de rendimiento aeróbico se ilustran en la Figura 2.

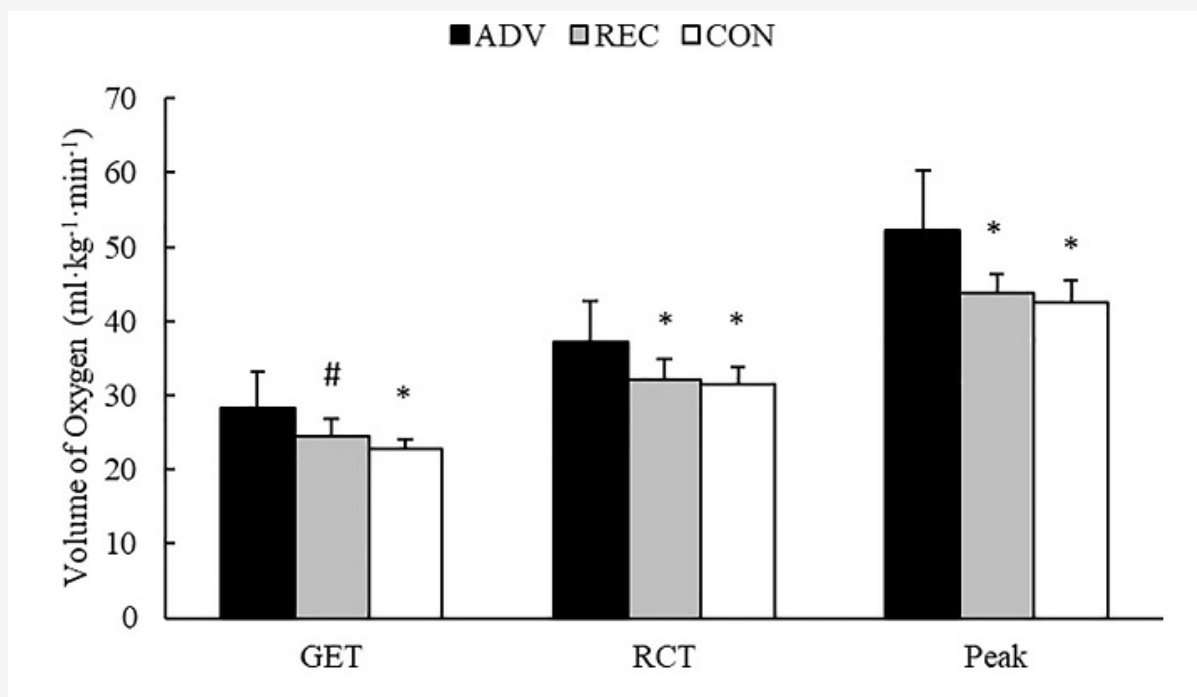


Figura 2. Diferencias grupales en las medidas de rendimiento aeróbico.
 * = Significativamente ($p < 0.05$) diferente de ADV. # = Diferente ($p < 0.10$) de ADV.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223548.g002>

Tasa metabólica en reposo

No se observó interacción grupo x sexo ($F = 0.21$, $p = 0.817$, $BF_{10} = 0.2$) o efecto de grupo principal ($F = 1.67$, $p = 0.220$, $BF_{10} = 0.1$) para los registros de RMR en ADV (1788 ± 232 kcal·día⁻¹), REC (1768 ± 407 kcal·día⁻¹) y CON (1572 ± 356 kcal·día⁻¹).

Composición corporal

No se observaron interacciones significativas entre grupo y sexo para ninguna medida de la composición corporal (presentadas en la Tabla 2). Sin embargo, la evidencia estuvo muy a favor de los efectos del grupo principal para la densidad corporal, la BMC regional y total, la masa magra regional y total y el % de BF. En comparación con el REC, el grupo ADV poseía mayor densidad corporal ($p = 0.004$), mayor BMC de los brazos ($p = 0.009$), mayor masa magra (es decir, total y regional; $p \leq 0.035$), menor % de BF ($p = 0.009$) y tendió a poseer más BMC (cuerpo total: $p = 0.066$; piernas: $p = 0.060$) y menos masa grasa ($p = 0.064$). En comparación con CON, el grupo ADV poseía una mayor densidad corporal ($p = 0.006$), mayor BMC en todo el cuerpo ($p \leq 0.024$), masa magra en todo el cuerpo ($p \leq 0.009$) y menor % de BF ($p = 0.023$). No se observaron diferencias entre REC y CON.

Tabla 2. Diferencias grupales en las medidas de composición corporal

	ADV			REC			CON			Group		Group x Sex	
	Women	Men	Total	Women	Men	Total	Women	Men	Total	p	BF ₁₀	p	BF ₁₀
<i>Anthropometric</i>													
Height (cm)	160 ± 13	177 ± 3	170 ± 11	161 ± 4	183 ± 8	172 ± 14	158 ± 4	180 ± 9	171 ± 14	0.785	>100	0.526	0.3
Weight (kg)	68.3 ± 5.0	91.5 ± 5.1	79.8 ± 13.3	59.0 ± 2.0	93.5 ± 9.5	76.3 ± 19.5	60.8 ± 6.3	84.9 ± 7.3	74.5 ± 14.3	0.127	>100	0.169	0.3
BMI (kg·m ⁻²)	26.0 ± 3.5	29.2 ± 1.9	27.6 ± 3.1	22.9 ± 1.2	28.0 ± 3.4	25.5 ± 3.6	24.4 ± 3.4	26.1 ± 0.7	25.4 ± 2.2	0.163	6.6	0.456	0.6
Density (kg·L ⁻¹)	1.07 ± 0.01	1.07 ± 0.01	1.07 ± 0.01	1.05 ± 0.01	1.06 ± 0.01	1.05 ± 0.01*	1.04 ± 0.02	1.06 ± 0.01	1.05 ± 0.02*	0.002	13.8	0.159	1.1
<i>Bone Mineral Content (kg)</i>													
Total	3.05 ± 0.38	3.75 ± 0.13	3.45 ± 0.44	2.42 ± 0.16	3.62 ± 0.41	3.02 ± 0.70#	2.43 ± 0.14	3.29 ± 0.41	2.92 ± 0.55*	0.012	>100	0.299	0.7
Arms	0.45 ± 0.07	0.62 ± 0.05	0.55 ± 0.11	0.32 ± 0.03	0.57 ± 0.05	0.44 ± 0.14*	0.30 ± 0.01	0.48 ± 0.06	0.40 ± 0.11*	0.001	>100	0.266	1.2
Legs	1.12 ± 0.13	1.44 ± 0.11	1.30 ± 0.20	0.82 ± 0.05	1.38 ± 0.17	1.10 ± 0.32#	0.81 ± 0.03	1.31 ± 0.22	1.09 ± 0.31*	0.022	>100	0.255	0.5
Trunk	0.95 ± 0.11	1.16 ± 0.03	1.07 ± 0.13	0.79 ± 0.11	1.11 ± 0.14	0.95 ± 0.21	0.82 ± 0.08	0.97 ± 0.09	0.90 ± 0.11*	0.028	>100	0.271	0.8
<i>Non-bone fat-free mass (kg)</i>													
Arms	7.15 ± 0.89	11.12 ± 1.22	9.42 ± 2.35	4.87 ± 0.49	10.02 ± 0.56	7.45 ± 2.79*	4.83 ± 0.42	9.04 ± 1.14	7.24 ± 2.40*	0.001	>100	0.400	0.6
Legs	18.4 ± 1.4	25.4 ± 1.6	22.4 ± 4.0	14.3 ± 1.0	24.4 ± 1.1	19.3 ± 5.4*	14.7 ± 0.7	22.5 ± 3.2	19.2 ± 4.7*	0.008	>100	0.252	0.5
Trunk	27.7 ± 2.9	35.2 ± 2.0	32.0 ± 4.5	20.3 ± 1.2	33.5 ± 1.4	26.9 ± 7.2*	21.4 ± 2.2	30.1 ± 3.7	26.4 ± 5.5*	0.001	>100	0.073	0.8
<i>4-compartment model</i>													
Body fat percentage (%)	11.9 ± 2.4	11.0 ± 2.6	11.4 ± 2.3	23.3 ± 2.4	16.1 ± 6.2	19.7 ± 5.8*	23.9 ± 8.4	13.7 ± 3.2	18.1 ± 7.6*	0.007	16.1	0.183	2.7
Fat-free mass (kg)	60.2 ± 3.5	81.3 ± 3.4	72.3 ± 11.7	45.2 ± 2.3	78.1 ± 5.3	61.7 ± 18.0*	45.9 ± 1.6	73.3 ± 8.4	61.6 ± 15.9*	0.001	>100	0.097	0.5
Fat mass (kg)	8.2 ± 2.1	10.2 ± 2.7	9.3 ± 2.5	13.8 ± 1.4	15.4 ± 7.0	14.6 ± 4.7#	14.9 ± 6.7	11.5 ± 2.2	13.0 ± 4.5	0.069	1.5	0.436	0.3

* = Significantly (p < 0.05) different from ADV

= Different (p < 0.10) from ADV.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223548.t002>

Fuerza

No se observaron interacciones significativas entre grupo y sexo para las variables obtenidas a partir de la evaluación isométrica del tirón de medio muslo. La evidencia extrema sugirió efectos significativos del grupo principal para la F (F = 3.89, p = 0.042, BF₁₀ = 667,577) y RFD a 200 ms (F = 3.67, p = 0.049, BF₁₀ = 12,676), así como tendencias para las diferencias de grupo en F a 150 ms (F = 2.80, p = 0.091, BF₁₀ = 1,898), F a 200 ms (F = 3.50, p = 0.055, BF₁₀ = 17,296), F a 250 ms (F = 3.14, p = 0.071, BF₁₀ = 21524), RFD a 150 ms (F = 2.94, p = 0.082, BF₁₀ = 1,868) y RFD a 250 ms (F = 3.37, p = 0.060, BF₁₀ = 20,187). Según el análisis post-hoc, el grupo ADV produjo un pico de F más alto que el grupo CON (p = 0.036) y expresó una mayor RFD a 200 ms que REC (p = 0.049). El grupo ADV también tendió a producir mayor F a 200 ms (p = 0.062) y 250 ms (p = 0.097) en comparación con REC. No se observaron otras diferencias específicas entre los grupos. Las diferencias de grupo en la producción de F y RFD a lo largo del tiempo se ilustran en la Fig. 3.

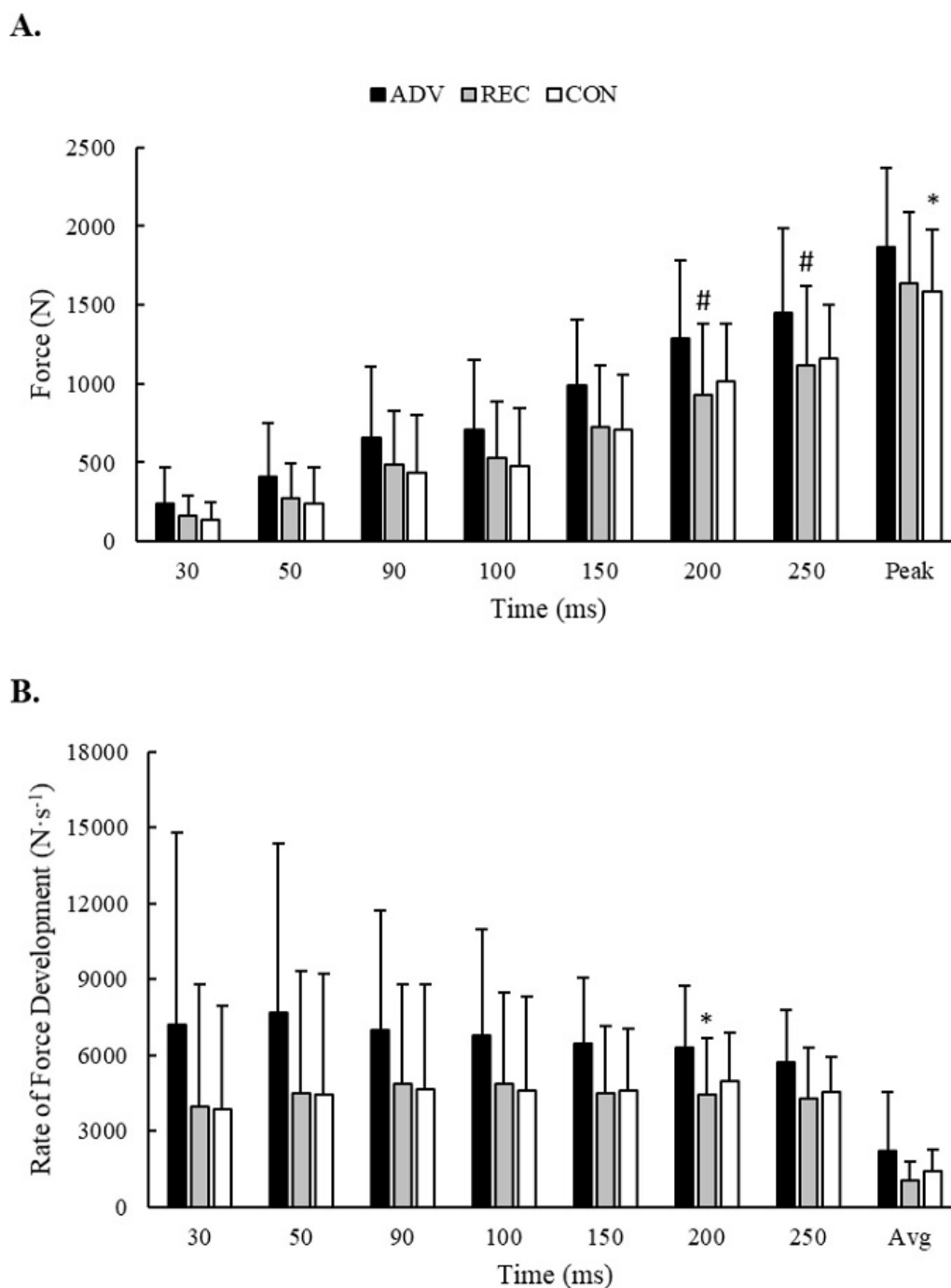


Figura 3. Diferencias de grupo en A) fuerza y B) tasa de producción de fuerza durante un tirón isométrico a mitad del muslo. * = Significativamente ($p < 0.05$) diferente de ADV. # = Diferente ($p < 0.10$) de ADV.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223548.g003>

Test de pedaleo máximo de 3 minutos

No se observaron interacciones significativas entre grupo y sexo para las medidas recogidas de la prueba de ciclismo máximo de 3 minutos. La evidencia extrema a favor de un efecto principal de grupo significativo para la CP ($F = 7.56$, $p = 0.005$, $BF_{10} = 267$) indicó que el grupo ADV poseía una CP más alta que REC ($p = 0.029$) y CON ($p = 0.005$). Aunque también se observó evidencia extrema para la AWC ($F = 4.79$, $p = 0.023$, $BF_{10} = 247$), el análisis *post-hoc* no reveló diferencias grupales específicas. No se observaron otras diferencias. Las diferencias grupales en las medidas de rendimiento durante la prueba de ciclismo máximo de 3 minutos se ilustran en la Figura 4.

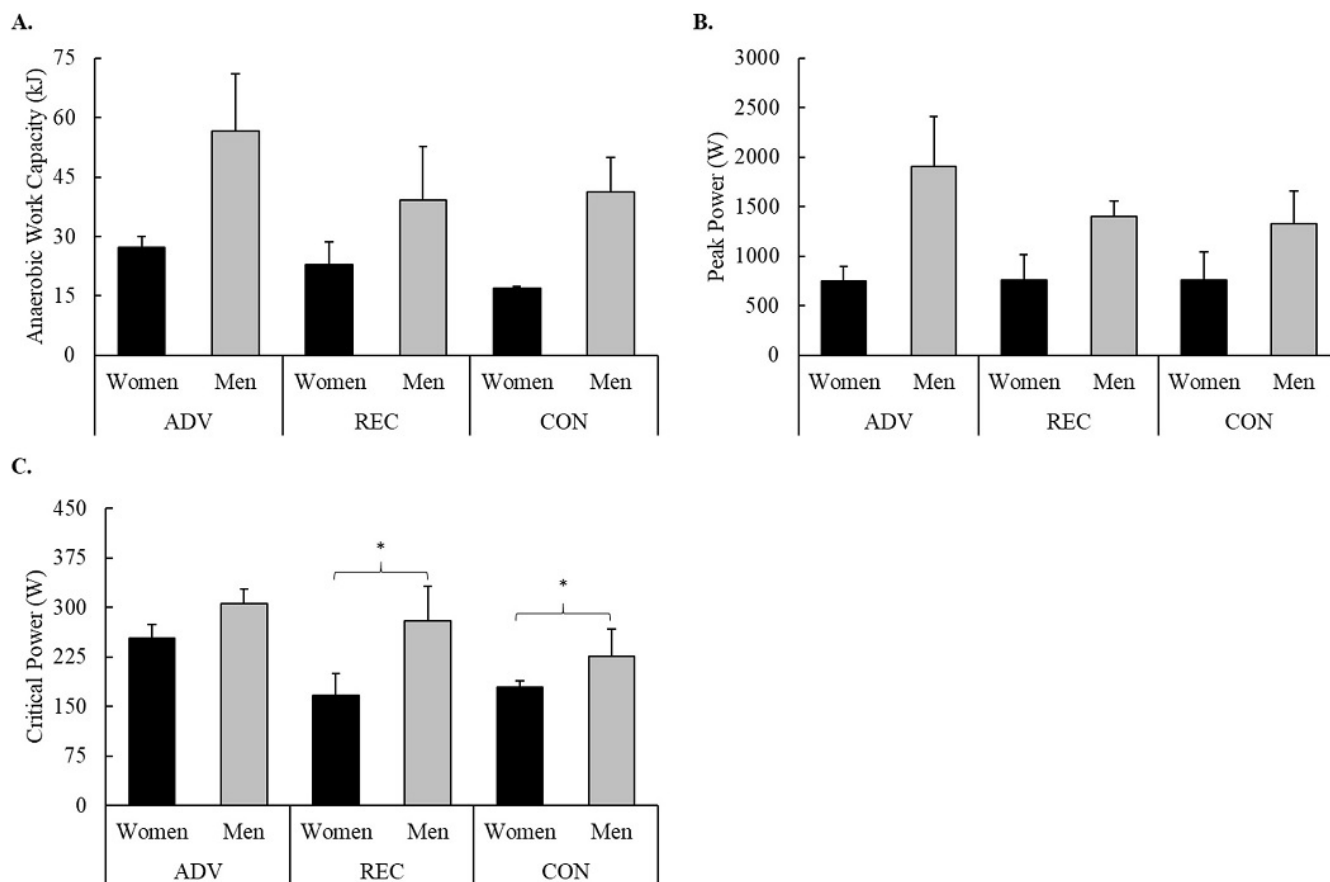


Figura 4. Diferencias de grupo en A) capacidad de trabajo anaeróbico, B) potencia máxima y C) potencia crítica. * = Significativamente ($p < 0.05$) diferente a ADV.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223548.g004>

Discusión

Los objetivos principales de este estudio fueron examinar las diferencias antropométricas, hormonales y fisiológicas entre atletas de CF avanzados, participantes de CF recreativo y adultos entrenados en fuerza y cardiovasculares. Anteriormente, sólo otra investigación transversal ha realizado comparaciones fisiológicas entre individuos con al menos un año de CF o experiencia en entrenamiento de la fuerza [27]. Los autores no informaron diferencias entre los grupos, excepto el grupo entrenado en CF que posee una mayor capacidad aeróbica. Sin embargo, este resultado no es sorprendente teniendo en cuenta que no se requirió que el grupo entrenado en fuerza también realizara ejercicio aeróbico. Sesiones típicas de entrenamiento de CF incorporan simultáneamente elementos de fuerza y acondicionamiento dentro del entrenamiento [1,2,51]. Aunque el componente de acondicionamiento varía en intensidad y duración para cada entrenamiento, es importante que las estrategias alternativas de ejercicio incluyan ambos elementos para hacer una comparación justa. El presente estudio se basa en esta limitación al requerir que los participantes en el grupo CON hayan participado en entrenamiento de fuerza y cardiovascular al menos 3 días por semana cada uno; Se esperaba una frecuencia de entrenamiento similar del grupo de CF recreativo (es decir, entrenamiento en al menos 3 días por semana). Otro aspecto importante del entrenamiento de CF que vale la pena considerar es que incluye una amplia variedad de ejercicios tradicionales de fuerza y de entrenamiento aeróbico, junto con movimientos gimnásticos de simples a más complejos. La habilidad en estos movimientos no puede ser asumida después de sólo un año de entrenamiento y es probable que necesite una modificación frecuente del entrenamiento. Recientemente, nuestro grupo ha informado diferentes respuestas fisiológicas y tasas de recuperación a los entrenamientos de CF que se completan según lo prescrito en comparación con los que se modifican (es decir, escalados) [11]. Por lo tanto, los participantes entrenados en CF debían poseer al menos dos años de experiencia y se dividieron en ADV y REC según la evidencia de su habilidad como atletas de CF (es decir, su éxito anterior en la competencia de CF). Dentro de este contexto, se observó que los atletas avanzados de CF tenían una composición corporal y características morfológicas musculares más favorables, así como una mayor capacidad aeróbica, fuerza y capacidad para mantener un esfuerzo de alta intensidad en comparación con los participantes de CF recreativo y los adultos físicamente activos. Por el contrario, no se observaron diferencias entre los participantes de CF recreativo y los adultos físicamente activos en ninguna medida y no se observaron diferencias en las concentraciones de hormonas en reposo o tasa metabólica en todos los grupos. Esta es la primera investigación en hacer comparaciones entre profesionales de CF en función de su rango competitivo y en relación con adultos activos entrenados en fuerza y cardiovascular.

La mayoría de los entrenamientos de CF competitivo requieren que los atletas realicen 2 o más ejercicios en un circuito o de manera alistada para varias repeticiones y rondas, y que lo hagan lo más rápido posible o que completen la mayor cantidad de trabajo posible dentro de un límite de tiempo dado [1,2,51]. Los atletas que pueden mantener un ritmo más rápido o recuperarse rápidamente entre períodos mínimos de descanso parecen estar mejor posicionados para sobresalir en este deporte. Un estudio reciente en atletas avanzados de CF, según lo determinado por su rendimiento en un entrenamiento de referencia común (por ej., "Fran"), respalda esta idea [52]. Feito y col. (2018) descubrieron que el mejor predictor de repeticiones completadas durante un entrenamiento de CF de 15 minutos era la cantidad de trabajo que los atletas podían realizar en la prueba final de 4 sprints máximos de Wingate separados por 90 segundos de descanso. En el presente estudio, el grupo ADV poseía un menor porcentaje de grasa corporal y una mayor masa libre de grasa no ósea en comparación con los grupos REC y CON. En los deportes, poseer una proporción ideal de músculo esquelético con respecto a la masa grasa, puede ofrecer una ventaja competitiva mejorando la eficiencia, la termorregulación y la capacidad de mantener el esfuerzo [53]. Además de su éxito histórico en la competencia de CF, el rendimiento del grupo ADV durante los tests proporciona evidencia de esta capacidad. Los participantes ADV poseían un pico de VO₂ más alto que los otros grupos, lo que implicaría que pudieron realizar trabajo aeróbico a lo largo de un mayor rango de cargas de trabajo [54,55], pero no explica completamente su capacidad para mantener el esfuerzo a intensidades más altas [56]. Como los requisitos de oxígeno de una carga de trabajo exceden la capacidad de un atleta para administrar oxígeno de manera eficiente, la capacidad de mantener el esfuerzo puede explicarse más a fondo mediante medidas de rendimiento anaeróbico y puntos de umbral específicos indicativos del inicio de la fatiga (es decir, GET, RCT y CP) [48,56,57]. También se descubrió que los participantes en el grupo ADV poseían un GET, RCT y CP más altos, los cuales todos están fuertemente correlacionados [57] y pensados (específicamente el RCT y la CP) para demarcar un punto en el que el ejercicio pasa de "pesado" a "severo" [57,58]. Juntos, estos datos sugieren que los atletas del grupo ADV en este estudio tenían una mayor capacidad para producir energía aeróbicamente, y que estaban mejor formados para mantener los esfuerzos en cargas de trabajo absolutas más altas y, por lo tanto, tener éxito en su deporte.

La masa esquelética y las características morfológicas del músculo sugieren una mayor capacidad para producir fuerza [59-62]. Es decir, el tamaño, la arquitectura y la calidad del músculo esquelético reflejan la capacidad del músculo activo para producir fuerza, mientras que la masa ósea proporciona el soporte estructural y la estabilidad necesaria para traducir efectivamente la producción de fuerza en el movimiento humano. En el presente estudio, los atletas del grupo ADV poseían mayor masa/tamaño óseo y muscular, ángulos de pinación más grandes, fascículos más cortos y mejor calidad en la musculatura del brazo y cuádriceps en comparación con los otros grupos. Sin embargo, esto sólo se transfirió parcialmente en una mayor producción de fuerza por parte de los participantes del grupo ADV durante el test de IMTP (tirón isométrico a medio muslo). El rendimiento del test de IMTP fue muy variable hasta 0 a 200-250 ms, sobre lo cual el grupo ADV claramente produjo mayor fuerza y a una velocidad más rápida. La falta de uniformidad en todas las medidas de fuerza podría explicarse testeando la especificidad y el conjunto de habilidades de nuestra muestra. La importancia de poder activar rápidamente el músculo (es decir, mayor RFD) y la magnitud de la producción de fuerza en el test IMTP varía entre los deportes y las actividades deportivas. En los levantadores de pesas, se han informado relaciones significativas entre los máximos de una repetición en los levantamientos olímpicos y la fuerza en el test de IMTP (pico y de 0 a 100-250 ms) [63], pero las relaciones con el RFD se han limitado a bandas de tiempo específicas (de 0 a 200-250 ms) [63] o no están claras en otros atletas [64,65]. Aunque la fuerza máxima en los levantamientos olímpicos y de potencia puede ayudar a distinguir la clasificación competitiva en los atletas de CF [8,10], no es un requisito común de la competencia de CF realizar estos levantamientos al máximo. Por el contrario, la mayoría de los entrenamientos competitivos utilizan cargas submáximas que se realizan por varias repeticiones o requieren que el atleta realice levantamientos máximos (o casi máximos) después de una tarea fatigante (es decir, no es una medida real de la fuerza máxima) [51]. También es posible que la composición del grupo ADV pueda ayudar a explicar la variabilidad observada antes de 200 ms. Si bien todos los participantes del grupo ADV obtuvieron un puntaje más alto que REC en el 'Open', su participación en rondas posteriores de la competencia de los Juegos, se produjo principalmente como parte de un equipo. Dentro de esta capacidad, los miembros del equipo pueden ser incluidos según su conjunto de habilidades (por ejemplo, atletas fuertes/potentes, atletas con habilidades gimnásticas, atletas de resistencia) para minimizar las debilidades del equipo. Esto difiere de los competidores individuales que deben ser competentes en un conjunto más amplio de habilidades para ser competitivos [8,10]. Actualmente, no existe evidencia que documente las diferencias fisiológicas entre los competidores individuales y de equipo de alto ranking.

Hay poca evidencia que sugiere que las alteraciones consistentes podrían ocurrir en las concentraciones en reposo en T, C o IGF-1 como resultado del entrenamiento crónico [14]. Por el contrario, sus concentraciones generalmente reflejan el estado actual del tejido muscular en respuesta a las demandas del entrenamiento. Los cambios transitorios en T, IGF-1 y C pueden ocurrir después de períodos de 'overreaching' (sobrealcance o sobrecarga) agudos y prolongados que podrían afectar negativamente el estado anabólico [14]. El entrenamiento de CF se caracteriza por un esfuerzo que maximiza la densidad del entrenamiento (es decir, completar una cantidad determinada de trabajo lo más rápido posible, o maximizar el trabajo completado dentro del marco de un tiempo dado) dentro de una estructura de entrenamiento no planificada (es decir, no periodizada) para promover la preparación física general [1,2]. Además, el *Open* de 5 semanas es la vía más común utilizada por los atletas para calificar para los Juegos [4,5]. Antes de un evento competitivo importante, los atletas pueden elevar la intensidad del entrenamiento para promover el máximo rendimiento [66]. Por lo tanto, la combinación de

la estrategia de entrenamiento de CF y el enfoque de un evento competitivo extenso e importante podría aumentar la probabilidad de un período prolongado de sobrecarga por estrés. Su aparición podría identificarse por cambios en las concentraciones hormonales en reposo, la tasa metabólica en reposo, el rendimiento, así como una variedad de otros factores [14,67,68]. Sin embargo, la presente investigación no reveló ninguna evidencia de estrés prolongado o adaptaciones negativas al entrenamiento. Las concentraciones de hormonas en reposo y las tasas metabólicas fueron similares entre los grupos y las ventajas fisiológicas demostradas por el grupo de ADV parecieron reflejar sus hábitos de entrenamiento informados durante los últimos seis meses (a través del cuestionario de historial médico y de actividad física). Excluyendo el componente de acondicionamiento típicamente presente en los entrenamientos de CF, los miembros de cada grupo informaron usar un número similar de series por grupo muscular (3-6), repeticiones (3-12) e intervalos de descanso (60-90 segundos) durante el componente de fuerza de sus entrenamientos. Sólo se informó que la frecuencia de entrenamiento era diferente con el grupo ADV, que utilizaba una forma de ejercicio de fuerza en aproximadamente 5.3 días por semana, mientras que los grupos de REC y de CON promediaron 4.6 días por semana y 3.7 días por semana, respectivamente. Aunque la mayor frecuencia de entrenamiento observada en el grupo ADV teóricamente habría brindado más oportunidades para acumular un volumen de entrenamiento y promover adaptaciones, también podría haber interferido con su recuperación. Sin embargo, el grupo ADV tenía una composición corporal más favorable y, en general, superó a los otros grupos en cada medida de rendimiento. Por lo tanto, a partir de un mes antes de la competencia, la recuperación adecuada parecería estar presente en este grupo. Del mismo modo, la falta de diferencias observadas entre REC y CON, que no estaban entrenando activamente para el *Open*, también proporciona evidencia de una recuperación adecuada. Las investigaciones futuras pueden ampliar esto al monitorear más de cerca el entrenamiento y el desempeño en torno a la competencia de *Open* extendida.

Los resultados de este estudio sugieren que los atletas de CF avanzados poseen una composición corporal más favorable, mayor masa ósea y muscular, mayor calidad y fuerza muscular, mayor capacidad aeróbica y una mayor capacidad para mantener el esfuerzo que los participantes de CF recreativo y los adultos físicamente activos. Las razones de estas diferencias siguen sin estar claras debido al diseño transversal de este estudio, pero pueden estar relacionadas con diferencias en la experiencia de entrenamiento y los hábitos de entrenamiento recientes. Aunque todos los participantes en este estudio podrían considerarse bien entrenados [69], los participantes del grupo ADV informaron que tenían más experiencia en el entrenamiento de fuerza y que habían estado entrenando con más frecuencia en los últimos 6 meses que los otros grupos. Es posible que sus ventajas sean simplemente el resultado del entrenamiento por un período de tiempo más largo o la creación de más oportunidades para aumentar su volumen de carga durante la semana. Sin documentación (es decir, registros extensivos y detallados de los entrenamientos), sin embargo, sólo es posible especular sobre su influencia potencial ya que factores desconocidos (por ejemplo, la calidad del entrenamiento, la predisposición genética) ciertamente podrían modular las adaptaciones resultantes. Puede ser útil para futuras investigaciones hacer comparaciones entre atletas avanzados de CF y personas no del CF con experiencia y hábitos de entrenamiento comparables para determinar mejor si existe una ventaja.

También es interesante notar que a pesar de las diferencias superficiales en cada estrategia (es decir, CF versus entrenamiento de fuerza tradicional y entrenamiento cardiovascular), se encontró que los grupos REC y CON poseen características fisiológicas similares. Es posible que esto fuera consecuencia de que nuestro tamaño de muestra fuera suficiente para observar grandes diferencias que existían entre los del grupo ADV y los otros grupos, pero no para diferencias más pequeñas que existían entre REC y CON. Sin embargo, también puede ser la consecuencia de que el esfuerzo y que el volumen de carga durante el entrenamiento, sean similares entre estos grupos. Para ser incluidos en el estudio, tanto REC como CON tuvieron que haber participado regularmente en la estrategia de entrenamiento elegida durante 3 a 5 días por semana durante al menos el año pasado. Sin embargo, más allá de este requisito, nuestra capacidad para cuantificar el volumen de carga de entrenamiento se limitó al registro de los participantes durante los últimos 6 meses. Las investigaciones longitudinales futuras que documentan tanto la calidad como la cantidad de estas formas de entrenamiento pueden ayudar a dar una idea de si existe una ventaja entre estas estrategias o si promueven adaptaciones comparables entre los adultos con actividad recreativa. Sin embargo, los hallazgos actuales representan un punto de partida para futuras comparaciones entre participantes experimentados de CF (atletas y recreacionales) y adultos entrenados en fuerza y cardiovascular, así como entre sexos de estas poblaciones..

REFERENCIAS

1. Glassman G. (2011). CrossFit training guide level 1. : *The CrossFit Journal*
2. Feito Y, Heinrich K, Butcher S, Poston W. (2018). High-Intensity Functional Training (HIFT): Definition and Research Implications for Improved Fitness. *Sports*. 2018;6(3):76.
3. Thompson WR. (2017). Worldwide survey of fitness trends for 2018: the CREP edition. *ACSM's Health & Fitness Journal*.

2017;21(6):10-9.

4. CrossFit. (2016). Finding the Fittest on Earth. *CrossFit Games [Internet]*. 2016 August 29, 2019. Available from: <https://games.crossfit.com/workouts/open/2016>.
5. CrossFit. (2019). Welcome to the 2019 CrossFit Games Season. *CrossFit Games [Internet]*. 2016 August 29, 2019.
6. Butcher SJ, Neyedly TJ, Horvey KJ, Benko CR. (2015). Do physiological measures predict selected crossFit® benchmark performance? *Open Access Journal of Sports Medicine*. 2015;6:241. *pmid:26261428*
7. Martínez-Gómez R, Valenzuela PL, Barranco-Gil D, Moral-González S, García-González A, Lucia A. (2019). Full-Squat as a Determinant of Performance in CrossFit. *International journal of sports medicine*. 2019;40(09):592-6.
8. Serafini PR, Feito Y, Mangine GT. (2018). Self-reported measures of strength and sport-specific skills distinguish ranking in an international online fitness competition. *Journal of strength and conditioning research*. 2018;32(12):3474-84. *pmid:28195976*
9. Bellar D, Hatchett A, Judge L, Breaux M, Marcus L. (2015). The relationship of aerobic capacity, anaerobic peak power and experience to performance in CrossFit exercise. *Biology of Sport*. 2015;32(4):315-20. *pmid:26681834*
10. Barbieri JF, Correia RF, Castaño LAA, Brasil DVC, Ribeiro AN. (2016). Comparative and correlational analysis of the performance from 2016 crossfit games high-level athletes. *Manual Therapy, Posturology & Rehabilitation Journal = Revista Manual Therapy*. 2017;15.
11. Mangine GT, Kliszczewicz BM, Boone JB, Williamson-Reisdorph CM, Bechke EE. (2019). Pre-anticipatory anxiety and autonomic nervous system response to two unique fitness competition workouts. *Sports*. 2019;7(9):199.
12. Casto KV, Edwards DA. (2016). Testosterone, cortisol, and human competition. *Horm Behav*. 2016;82:21-37. *pmid:27103058*
13. Kivlighan KT, Granger DA. (2006). Salivary α -amylase response to competition: Relation to gender, previous experience, and attitudes. *Psychoneuroendocrinology*. 2006;31(6):703-14. *pmid:16624493*
14. Kraemer WJ, Ratamess NA. (2005). Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports medicine*. 2005;35(4):339-61. *pmid:15831061*
15. McGee KJ, Burkett LN. (2003). The National Football League Combine: A Reliable Predictor of Draft Status? *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2003;17(1):6-11.
16. Mangine GT, Hoffman JR, Vazquez J, Pichardo N, Fragala MS, Stout JR. (2013). Predictors of fielding performance in professional baseball players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 2013;8(5):510-6. *pmid:23348012*
17. Hoffman JR, Vazquez J, Pichardo N, Tenenbaum G. (2009). Anthropometric and performance comparisons in professional baseball players. *Journal of Strength & Conditioning Research*. 2009;23(8):2173-8.
18. Mangine GT, Hoffman JR, Wells AJ, Gonzalez AM, Rogowski JP, Townsend JR, et al. (2014). Visual Tracking Speed Is Related to Basketball-Specific Measures of Performance in NBA Players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2014;28(9):2406-14.
19. Feito Y, Brown C, Olmos A. (2019). A content analysis of the High-Intensity Functional Training Literature: a look at the past and directions for the future. *Human Movement*. 2019;20(2):1-15.
20. Heinrich KM, Spencer V, Fehl N, Carlos Poston WS. (2012). Mission essential fitness: comparison of functional circuit training to traditional Army physical training for active duty military. *Military Medicine*. 2012;177(10):1125-30. *pmid:23113436*
21. Barfield J, Anderson A. (2014). Effect of CrossFit™ on health-related physical fitness: A pilot study. *Journal of Sport and Human Performance*. 2014;2(1).
22. Barfield J, Channell B, Pugh C, Tuck M, Pendel D. (2012). Format of basic instruction program resistance training classes: Effect on fitness change in college students. *Physical Educator*. 2012;69(4):325.
23. Feito Y, Patel P, Sal Redondo A, Heinrich KM. (2019). Effects of Eight Weeks of High Intensity Functional Training on Glucose Control and Body Composition among Overweight and Obese Adults. *Sports*. 2019;7(2):51.
24. Buckley S, Knapp K, Lackie A, Lewry C, Horvey K, Benko C, et al. (2015). Multimodal high-intensity interval training increases muscle function and metabolic performance in females. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. 2015;40(11):1157-62. *pmid:26513008*
25. Carnes AJ, Mahoney SE. (2019). Polarized Versus High-Intensity Multimodal Training in Recreational Runners. *International journal of sports physiology and performance*. 2019;14(1):105-12.
26. Ratamess N, Alvar B, Evetoch T, Housh T, Kibler W, Kraemer W. (2009). Progression models in resistance training for healthy adults [ACSM position stand]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2009;41(3):687-708.
27. de Sousa AF, dos Santos GB, dos Reis T, Valerino AJ, Del Rosso S, Boullosa DA. (2016). Differences in Physical Fitness between Recreational CrossFit® and Resistance Trained Individuals. *Journal of Exercise Physiology Online*. 2016;19(5).
28. Mangine GT, Cebulla B, Feito Y. (2018). Normative values for self-reported benchmark workout scores in crossfit® practitioners. *Sports medicine-open*. 2018;4(1):39. *pmid:30128825*
29. Ichinose Y, Kanehisa H, Ito M, Kawakami Y, Fukunaga T. (1998). Morphological and functional differences in the elbow extensor muscle between highly trained male and female athletes. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*. 1998;78(2):109-14. *pmid:9694308*
30. Arroyo E, Stout JR, Beyer KS, Church DD, Varanoske AN, Fukuda DH, et al. (2018). Effects of supine rest duration on ultrasound measures of the vastus lateralis. *Clinical physiology and functional imaging*. 2018;38(1):155-7. *pmid:27981803*
31. Cadore EL, Izquierdo M, Conceição M, Radaelli R, Pinto RS, Baroni BM, et al. (2012). Echo intensity is associated with skeletal muscle power and cardiovascular performance in elderly men. *Experimental Gerontology*. 2012;47(6):473-8. *pmid:22525196*
32. Chapman DW, Newton M, McGuigan MR, Nosaka K. (2008). Comparison between old and young men for responses to fast velocity maximal lengthening contractions of the elbow flexors. *European Journal of Applied Physiology*. 2008;104(3):531-9. *pmid:18584196*
33. Bembem M. (2002). Use of diagnostic ultrasound for assessing muscle size. *Journal of Strength & Conditioning Research*. 2002;16(1):103-8.

34. Scanlon TC, Fragala MS, Stout JR, Emerson NS, Beyer KS, Oliveira LP, et al. (2013). Muscle architecture and strength: Adaptations to short-term resistance training in older adults. *Muscle & Nerve*.
35. Young HJ, Jenkins NT, Zhao Q, Mccully KK. (2015). Measurement of intramuscular fat by muscle echo intensity. *Muscle & nerve*. 2015;52(6):963-71.
36. Kumagai K, Abe T, Brechue WF, Ryushi T, Takano S, Mizuno M. (2000). Sprint performance is related to muscle fascicle length in male 100-m sprinters. *Journal of Applied Physiology*. 2000;88(3):811-6. *pmid:10710372*
37. Astorino TA, Robergs RA, Ghasvand F, Marks D, Burns S. (2000). Incidence of the oxygen plateau at VO2max during exercise testing to volitional fatigue. *Journal of exercise physiology online*. 2000;3(4):1-12.
38. Wasserman K, McIlroy MB. (1964). Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *The American journal of cardiology*. 1964;14(6):844-52.
39. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of applied physiology*. 1986;60(6):2020-7. *pmid:3087938*
40. Wasserman K, Whipp BJ, Koyl S, Beaver W. (1973). Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *Journal of applied physiology*. 1973;35(2):236-43. *pmid:4723033*
41. Compher C, Frankenfield D, Keim N, Roth-Yousey L, Group EAW. (2006). Best practice methods to apply to measurement of resting metabolic rate in adults: a systematic review. *Journal of the American Dietetic Association*. 2006;106(6):881-903. *pmid:16720129*
42. McCrory MA, Molé PA, Gomez TD, Dewey KG, Bernauer EM. (1998). Body composition by air-displacement plethysmography by using predicted and measured thoracic gas volumes. *Journal of Applied Physiology*. 1998;84(4):1475-9. *pmid:9516218*
43. Wang Z, Deurenberg P, Guo SS, Pietrobelli A, Wang J, Pierson R Jr, et al. (1998). Six-compartment body composition model: inter-method comparisons of total body fat measurement. *International journal of obesity*. 1998;22(4):329. *pmid:9578238*
44. Haff GG, Ruben RP, Lider J, Twine C, Cormie P. (2015). A comparison of methods for determining the rate of force development during isometric midhigh clean pulls. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2015;29(2):386-95.
45. Bergstrom HC, Housh TJ, Zuniga JM, Traylor DA, Lewis RW Jr, Camic CL, et al. (2014). Differences among estimates of critical power and anaerobic work capacity derived from five mathematical models and the three-minute all-out test. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2014;28(3):592-600.
46. Marsh AP, Martin PE. (1997). Effect of cycling experience, aerobic power, and power output on preferred and most economical cycling cadences. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 1997;29(9):1225-32. *pmid:9309635*
47. Burnley M, Doust JH, Vanhatalo A. (2006). A 3-min all-out test to determine peak oxygen uptake and the maximal steady state. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2006;38(11):1995-2003.
48. Vanhatalo A, Doust JH, Burnley M. (2007). Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. *Medicine and science in sports and exercise*. 2007;39(3):548-55. *pmid:17473782*
49. Rouder JN, Morey RD, Speckman PL, Province JM. (2012). Default Bayes factors for ANOVA designs. *Journal of Mathematical Psychology*. 2012;56(5):356-74.
50. Wagenmakers E-J, Love J, Marsman M, Jamil T, Ly A, Verhagen J, et al. (2018). Bayesian inference for psychology. Part II: Example applications with JASP. *Psychonomic bulletin & review*. 2018;25(1):58-76.
51. CrossFit. (2019). Open Workouts. *CrossFit Games [Internet]*. 2019; (May 1). Available from: <https://games.crossfit.com/workouts/open/2019>.
52. Feito Y, Giardina MJ, Butcher S, Mangine GT. (2018). Repeated anaerobic tests predict performance among a group of advanced CrossFit-trained athletes. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. 2018;44(7):727-35. *pmid:30500263*
53. O'Connor H, Slater G. (2011). Losing, gaining and making weight for athletes. *Sport and Exercise Nutrition West Sussex, UK: Wiley-Blackwell*. 2011:210-32.
54. Hawkins MN, Raven PB, Snell PG, Stray-Gundersen J, Levine BD. (2007). Maximal oxygen uptake as a parametric measure of cardiorespiratory capacity. *Med Sci Sports Exerc*. 2007;39(1):103-7. *pmid:17218891*
55. 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*. 2003;95(5):1901-7. *pmid:12857763*
56. Medbo JI, Tabata I. (1989). Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *Journal of Applied Physiology*. 1989;67(5):1881-6. *pmid:2600022*
57. Bergstrom HC, Housh TJ, Zuniga JM, Traylor DA, Camic CL, Lewis RW Jr, et al. (2013). The relationships among critical power determined from a 3-min all-out test, respiratory compensation point, gas exchange threshold, and ventilatory threshold. *Research quarterly for exercise and sport*. 2013;84(2):232-8. *pmid:23930549*
58. Chicharro JL, Hoyos J, Lucía A. (2000). Effects of endurance training on the isocapnic buffering and hypocapnic hyperventilation phases in professional cyclists. *British journal of sports medicine*. 2000;34(6):450-5. *pmid:11131234*
59. Miller TA. (2012). NSCA's Guide to Tests and Assessments: Human Kinetics.
60. Schipilow J, Macdonald H, Liphardt A, Kan M, Boyd S. (2013). Bone micro-architecture, estimated bone strength, and the muscle-bone interaction in elite athletes: an HR-pQCT study. *Bone*. 2013;56(2):281-9. *pmid:23800515*
61. Lieber RL, Fridén J. (2000). Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*. 2000;23(11):1647-66.
62. Stock MS, Mota JA, Hernandez JM, Thompson BJ. (2017). Echo intensity and muscle thickness as predictors Of athleticism and isometric strength in middle-school boys. *Muscle & nerve*. 2017;55(5):685-92.
63. Beckham G, Mizuguchi S, Carter C, Sato K, Ramsey M, Lamont H, et al. (2013). Relationships of isometric mid-thigh pull variables to weightlifting performance. *J Sports Med Phys Fitness*. 2013;53(5):573-81. *pmid:23903539*
64. McGuigan MR, Winchester JB. (2008). The relationship between isometric and dynamic strength in college football players. *Journal of sports science & medicine*. 2008;7(1):101.
65. Stone MH, Sanborn K, O'BRYANT HS, HARTMAN M, STONE ME, PROULX C, et al. (2003). Maximum strength-power-performance relationships in collegiate throwers. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2003;17(4):739-45.

66. Haff GG. (2015). Periodization for Tactical Populations. In: Alvar BA, Sell K, Deuster PA, editors. *NSCA's Essentials of Tactical Strength and Conditioning*. 1st ed. Champaign, IL: Human Kinetics, Inc.; 2015. p. 181-205.
67. Bahr R, Opstad P, Medbø J, Sejersted O. (1991). Strenuous prolonged exercise elevates resting metabolic rate and causes reduced mechanical efficiency. *Acta Physiologica Scandinavica*. 1991;141(4):555-63. *pmid:1877354*
68. Lee EC, Fragala MS, Kavouras SA, Queen RM, Pryor JL, Casa DJ. (2017). Biomarkers in sports and exercise: tracking health, performance, and recovery in athletes. *Journal of strength and conditioning research*. 2017;31(10):2920. *pmid:28737585*
69. Sheppard JM, Triplett NT. (2015). Program Design for Resistance Training. In: Haff GG, Triplett NT, editors. *Essentials of Strength Training and Conditioning*. 4th ed: Human Kinetics; 2015. p. 439-69.

Cita Original

Mangine GT, Stratton MT, Almeda CG, Roberts MD, Esmat TA, VanDusseldorp TA, et al. (2020) Physiological differences between advanced CrossFit athletes, recreational CrossFit participants, and physically-active adults. *PLoS ONE* 15(4): e0223548. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223548>