

Article

El Ciclismo Excéntrico No Mejora el Rendimiento de los Ciclistas Amateur

Gøran Paulsen, Hedda Ø. Eidsheim, Christian Helland, Olivier Seynnes, Paul A. Solberg y Bent R. Rønnestad

RESUMEN

El entrenamiento de ciclismo excéntrico induce la hipertrofia muscular y aumenta la producción de potencia de las articulaciones en los no deportistas. Además, el ciclismo excéntrico puede considerarse un tipo de entrenamiento de fuerza específico del movimiento para los ciclistas, pero hasta ahora no se sabe si el entrenamiento de ciclismo excéntrico puede mejorar el rendimiento del ciclismo en ciclistas entrenados. Veintitrés ciclistas amateur masculinos fueron asignados al azar a un grupo de entrenamiento de ciclismo excéntrico o concéntrico. El ciclismo excéntrico se realizó a una cadencia baja (~40 revoluciones por minuto) y la intensidad fue controlada por el esfuerzo percibido (12-17 en la escala de Borg) durante intervalos de 2 minutos (repetido 5-8 veces). La cadencia y el esfuerzo percibido del grupo concéntrico coincidían con los del grupo excéntrico. Además, después del ciclismo excéntrico o concéntrico, ambos grupos realizaron intervalos aeróbicos tradicionales con una cadencia libremente elegida en la misma sesión (4-5 x 4-15 min.). Los participantes entrenaron dos veces por semana durante 10 semanas. Se evaluó el consumo máximo de oxígeno (VO₂max), la producción de potencia aeróbica máxima (Wmax), el umbral de lactato, la fuerza isocinética, el grosor muscular, las características de pedaleo y el rendimiento del ciclismo (sprints de 6 y 30 segundos y una prueba crono de 20 minutos) antes y después del período de intervención. Las inferencias sobre el valor real de los efectos se evaluaron mediante inferencias probabilísticas basadas en la magnitud. El ciclismo excéntrico indujo hipertrofia muscular ($2,3 \pm 2,5\%$ más que el concéntrico) y aumento de la fuerza excéntrica ($8,8 \pm 5,9\%$ más que el concéntrico), pero estos efectos de pequeña magnitud no parecieron trasladarse a mejoras en las evaluaciones fisiológicas o en el rendimiento del ciclismo. Por el contrario, el entrenamiento excéntrico parecía tener efectos limitantes o perjudiciales sobre el rendimiento del ciclismo, medido como Wmax y una prueba crono de 20 minutos. En conclusión, el entrenamiento de ciclismo excéntrico no mejoró el rendimiento de ciclismo en ciclistas amateur. Se requiere investigación adicional para determinar si los presentes hallazgos reflejan una falta real de eficacia, efectos negativos o una respuesta retardada al entrenamiento de ciclismo excéntrico.

INTRODUCCIÓN

La capacidad de un ciclista para liberar energía y la habilidad de transferirla al pedalear la bicicleta son los principales factores determinantes del rendimiento en el ciclismo. El rendimiento del ciclismo en carretera está limitado principalmente por la capacidad de energía aeróbica, pero el entrenamiento de la fuerza (anaeróbico) ha demostrado ser un valioso complemento al entrenamiento de resistencia tradicional de los ciclistas [1,2]. Rønnestad et al. [3] mostraron que 12 semanas de entrenamiento de fuerza mejoraron la economía del ciclismo durante el ciclismo submáximo de larga duración y aumentaron la producción media de potencia en los últimos 5 minutos con el máximo esfuerzo. Otros estudios apoyan estos hallazgos [4], pero los efectos beneficiosos del entrenamiento de fuerza no son inequívocos [1].

Curiosamente, Vikmoen et al. [4] encontraron una fuerte relación entre la hipertrofia muscular del cuádriceps y las mejoras en el rendimiento del ciclismo después de 11 semanas de entrenamiento de fuerza (40 minutos de prueba crono). Además, más allá de la hipertrofia, la conversión de las fibras musculares tipo IIX a tipo IIA también se asoció con mejoras en el rendimiento [4,5]. En consecuencia, podríamos plantear la hipótesis de que la falta de respuesta al entrenamiento de fuerza en ciclistas podría deberse a la falta de hipertrofia y/o a la conversión del tipo de fibra. Parece razonable prever que el entrenamiento de fuerza no siempre resulta en adaptaciones morfológicas musculares en ciclistas, ya que el entrenamiento de fuerza se lleva a cabo junto con un gran volumen de entrenamiento aeróbico de resistencia [2]. Esto es consistente con informes anteriores que sugieren que el entrenamiento de resistencia simultáneo puede mitigar los efectos del entrenamiento de fuerza mediante la inhibición de las vías anabólicas [6]. Sin embargo, debemos reconocer que el entrenamiento de fuerza induce efectos neurales, por ejemplo, una mayor tasa de desarrollo de fuerza (RFD) a través de una mayor frecuencia de disparo de motoneurona [1] y que estos efectos neurales pueden contribuir a un mejor rendimiento del ciclismo independientemente de la hipertrofia muscular [2].

Asumiendo que la hipertrofia inducida por el entrenamiento de fuerza y la conversión del tipo de fibra (IIX a IIA) contribuyen a mejorar el rendimiento del ciclismo (por ejemplo: [4]), podemos deducir que los ejercicios que activan las unidades motoras IIX (es decir, todas las unidades motoras) son imperativos para los ciclistas. Con este fin, la alta carga impuesta durante el ejercicio excéntrico ha demostrado ser efectiva para inducir la hipertrofia y la fuerza muscular, y para iniciar la conversión de tipo IIX a tipo IIA [7,8,9,10].

El ciclismo excéntrico se introdujo inicialmente como una forma de investigar la fisiología del trabajo muscular concéntrico y excéntrico [11], y como un modelo para el daño muscular inducido por el ejercicio [12]. En los últimos años, el ciclismo excéntrico se ha aplicado para aumentar la fuerza de los extensores de rodilla y la hipertrofia en diferentes poblaciones, y para facilitar la recuperación de lesiones, como la ruptura del ligamento cruzado anterior [9]. Además, Leong et al. [13] observaron una mejoría en la potencia máxima de ciclismo concéntrico y un aumento en el grosor del vasto lateral y recto femoral después de sólo 8 semanas de ciclismo excéntrico (5-10,5 minutos por sesión) en participantes jóvenes y sanos (no deportistas). Sorprendentemente, pocos estudios han incluido a deportistas, pero Gross et al. [14] informaron que el ciclismo excéntrico (20 minutos, 3 sesiones por semana) indujo hipertrofia muscular y mejoró la altura del countermovement jump en esquiadores alpinos junior. Hasta donde sabemos, ningún estudio ha probado la eficacia del ciclismo excéntrico para mejorar el rendimiento del ciclismo en ciclistas de carretera. Además, estudios anteriores han llevado a cabo el ciclismo excéntrico en una bicicleta reclinada, mientras que aquí utilizamos una bicicleta común que permite un posicionamiento más específico del ciclismo durante el ejercicio.

El principio de especificidad ha sido documentado desde hace mucho tiempo en relación con el rango de las articulaciones y se cree que está relacionado tanto con las adaptaciones neuronales como las morfológicas [15]. Dado que el ciclismo convencional requiere trabajo concéntrico puro, se espera que las adaptaciones neurales derivadas del ciclismo excéntrico tengan una transferencia limitada a un mejor rendimiento del ciclismo [8,16]. Sin embargo, la especificidad del ejercicio excéntrico (acciones de alargamiento muscular a niveles de fuerza más altos) podría inducir cambios arquitectónicos distintivos de ventaja para la producción de potencia del ciclismo. Basándose en las observaciones de estudios sobre otras formas de entrenamiento excéntrico [17,18], se puede esperar una mayor hipertrofia muscular regional y una mayor longitud del fascículo del entrenamiento de ciclismo excéntrico.

Por consiguiente, el propósito del presente estudio fue comparar los efectos del ciclismo excéntrico específico con el ciclismo concéntrico habitual, con el mismo esfuerzo y cadencia percibidos, sobre el rendimiento del ciclismo y los determinantes fisiológicos del rendimiento del ciclismo en ciclistas entrenados y amateur de carretera. Se planteó la hipótesis de que el ciclismo excéntrico funcionaría como una forma específica de entrenamiento de fuerza y, por lo tanto, aumentaría el grosor de los extensores de rodilla (hipertrofia), lo que resultaría en un mejor rendimiento del ciclismo tanto en pruebas de corta (anaeróbica) como de larga duración (aeróbica).

MÉTODOS

Diseño

El presente estudio fue un ensayo controlado aleatorio. Los participantes fueron asignados aleatoriamente a un grupo ciclista excéntrico (ECC) o a un grupo ciclista concéntrico (CON). El grupo CON realizó ciclismo concéntrico convencional, con la misma baja cadencia y tasa de esfuerzo percibido (RPE) que el grupo ECC (Tabla 1). Además del entrenamiento excéntrico y concéntrico de baja cadencia, todos los participantes realizaron el entrenamiento aeróbico tradicional a intervalos en los mismos días (Tabla 1). Los participantes se sometieron a un período de 10 semanas de entrenamiento supervisado (17 sesiones). Las pruebas fisiológicas y de rendimiento se realizaron una semana antes y después del período

de intervención. Las pre-pruebas fueron precedidas por una sesión de familiarización.

Tabla 1. Resumen del período de intervención.

Week	ECC/CON	RPE (Borgs scale)	Aerobic intervals 1st session	Aerobic intervals 2nd session	RPE (Borgs scale)
1	Familiarization to tests and pre-testing				
2	5x2 min*	12	4x12 min (83–87% HR _{max})	4x15 min (83–87% HR _{max})*	15–16
3	5x2 min	13	4x12 min (83–87% HR _{max})	4x15 min (83–87% HR _{max})	15–16
4	6x2 min	13	4x12 min (83–87% HR _{max})	4x15 min (83–87% HR _{max})	15–16
5	6x2 min	14	5x8 min (88–92% HR _{max})	4x10 min (88–92% HR _{max})	16
6	7x2 min	15–16	5x8 min (88–92% HR _{max})	4x10 min (88–92% HR _{max})	16–17
7	8x2 min	15–16	5x8 min (88–92% HR _{max})	4x10 min (88–92% HR _{max})	16–17
8	8x2 min	16–17	5x4 min (93–98% HR _{max})	5x6 min (93–98% HR _{max})	17
9	7x2 min	16–17	5x4 min (93–98% HR _{max})	5x6 min (93–98% HR _{max})	17–18
10	6x2 min	16–17	5x4 min (93–98% HR _{max})	5x6 min (93–98% HR _{max})	17–18
11	Post-testing				

*2 min rest periods between all intervals.

CON: Concentric cycling; ECC: Eccentric cycling; HR_{max}: Maximal heart rate; RPE: Rate of perceived exertion.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208452.t001>

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208452.t001>

Participantes

Los participantes fueron 23 ciclistas amateur (33 ± 12 años y 77 ± 7 kg), con un volumen medio de entrenamiento de 10 ± 5 horas semanales en el año anterior al estudio. En los últimos 3 meses anteriores al estudio, habían realizado $1,0 \pm 1,7$ horas semanales de entrenamiento de fuerza, y ninguno de los deportistas realizó un entrenamiento sistemático de ciclismo de velocidad (por ejemplo, intervalos de <30 segundos). En base a los criterios presentados por De Pauw et al. [19], nuestro ciclista podría definirse como entrenado (nivel 3 ó 4 de 5). Todos los ciclistas completaron el estudio.

El estudio se realizó de acuerdo con las normas éticas establecidas por la Declaración de Helsinki de 1975 y fue aprobado por el comité ético local del Departamento de Ciencias del Deporte de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Noruega Interior, Lillehammer; y la Autoridad Noruega de Protección de Datos. Todos los participantes firmaron un formulario de consentimiento informado.

Pruebas de Ciclismo

Todas las pruebas de ciclismo se realizaron con un ciclo-ergómetro Lode Excalibur Sport (Lode, Groningen, The Netherlands), y se realizaron en condiciones ambientales estandarizadas: 16° – 18° y 30–40% de humedad. A los participantes se les pidió que se abstuvieran de la cafeína y la nicotina 4 horas antes de la prueba y que evitaran la actividad física de alta intensidad el día antes de la prueba. La ingesta de alimentos se estandarizó individualmente en los días de prueba. Las pruebas de rendimiento y fisiológicas se realizaron durante dos días. Durante el primer día se realizó un protocolo de perfil de lactato sanguíneo, el VO₂max, y una prueba crono de 20 minutos, mientras que las pruebas de sprint se realizaron junto con las pruebas de fuerza isocinética en el segundo día. Se dieron 20 minutos de descanso entre el VO₂max y la prueba crono de 20 minutos, mientras que entre las otras pruebas se dieron 10 minutos.

Perfiles de Lactato Sanguíneo, Economía del Ciclismo y VO₂máx.

Con la cadencia elegida libremente, la prueba de perfil de lactato comenzó a 125 W durante 5 minutos. A continuación, la carga se incrementó en 50 W cada 5 minutos hasta alcanzar una concentración de lactato en sangre capilar ([La-]b) de 3,0 mmol•L⁻¹. La carga se incrementó en 25 W hasta que se alcanzó un [La-]b de 4,0 mmol•L⁻¹ (Biosen C-line Clinic, EKF Diagnostics, GmbH, Barleben, Alemania). El umbral de lactato se determinó como la potencia de salida en 4 mmol•L⁻¹ [La-]b, calculada a partir de la relación entre [La-]b y la potencia de salida utilizando una regresión lineal entre la [La-]b más cercana inferior y superior a 4 mmol•L⁻¹. La economía de ciclismo (W•ml O₂-1) se calculó a partir del consumo medio de oxígeno entre 3 y 4,5 minutos de las dos primeras etapas submáximas (125 W y 175 W).

La prueba de VO₂max se inició con 1 minuto de ciclismo a una potencia de salida correspondiente a 3 W·kg⁻¹ (redondeada a 50 W más cercano). La potencia de salida se incrementó posteriormente en 25 W cada minuto hasta el agotamiento. El VO₂max se determinó por el promedio de las dos mediciones de VO₂ más altas (períodos de 30 segundos), y la potencia de salida máxima aeróbica (W_{max}) se calculó como la potencia media de salida del último minuto de la prueba.

Mediciones de la Fuerza de Pedaleo.

El torque generado en el eje del cigüeñal se medía cada 2° mediante galgas extensométricas desarrolladas y adheridas al brazo del cigüeñal por el fabricante del ciclo-ergómetro Lode. El torque máximo, el ángulo del torque máximo y el torque mínimo fueron promediados desde ambas piernas. El torque máximo se calculó como la media del torque de propulsión más alto durante la fase de descenso, mientras que el torque mínimo se calculó como la media del torque resistivo más alto durante la fase de ascenso. Los ángulos del cigüeñal se referenciaron a 0° en el punto muerto superior y 180° en el punto muerto inferior; la calibración de ajuste cero en el software Lode se realizó antes de cada prueba (Lode Ergometry Manager 9.3.1.0). Los datos del torque del cigüeñal se registraron como la media de 1,5 a 4,5 minutos durante el período de 5 minutos más cercano a 4 mmol·L⁻¹ de lactato durante la prueba de perfil de lactato sanguíneo (273 ± 23 W para el grupo ECC y 239 ± 42 W para el grupo CON). En la post-prueba, se realizaron mediciones individuales del torque del cigüeñal a la misma potencia de salida y con la misma cadencia que durante la pre-prueba.

Prueba Crono de 20 minutos.

En la prueba crono de 20 minutos, los participantes buscaron la mayor potencia media de salida posible (ciclo-ergómetro Lode Excalibur Sport). La cadencia fue elegida libremente, y los participantes controlaron la potencia durante toda la prueba utilizando una unidad de control electrónica que gobernaba el freno electromagnético en la rueda del ciclo-ergómetro (modo hiperbólico). La [La]b fue medida cada 5 minutos. La cantidad de agua o bebida deportiva consumida se anotó durante la pre-prueba y se repitió durante la post-prueba.

Pruebas de Ciclismo de Velocidad.

Se realizó un calentamiento específico del ciclismo de 10 minutos, incluyendo dos sprints submáximos y un descanso de 1 minuto, antes de las pruebas de sprint de 6 y 30 segundos (Wingate) (ciclo-ergómetro Lode Excalibur Sport). La prueba de 6 segundos se realizó con el máximo esfuerzo a partir de una posición de reposo (2 intentos; 2 minutos de reposo; el mejor intento se utilizó para el análisis estadístico). La prueba de 30 segundos de Wingate comenzó mientras se pedaleaba a 60 revoluciones por minuto (RPM) sin resistencia de frenado. Luego, después de una cuenta regresiva de 3 segundos, se aplicó la resistencia de frenado al volante y permaneció constante durante toda la prueba. La resistencia de frenado se fijó en 0,75 Nm·kg⁻¹ de masa corporal tanto en la prueba de 6 segundos como en la de 30 segundos. La cadencia se muestreó a 5 Hz y se calcularon los valores de potencia de salida correspondientes (Lode Ergometry Manager 9.3.1.0). La potencia media de salida se presentó como la potencia media de salida sostenida durante las pruebas de 6 y 30 segundos. Los ciclistas permanecieron sentados durante las pruebas y se les dio un fuerte aliento verbal. Los participantes fueron instruidos a pedalear lo más rápido posible desde el principio y a no conservar energía para la última parte de la prueba (para evitar regular el ritmo durante la prueba Wingate).

Pruebas de Fuerza Isocinética

Sentados con 85° en las caderas, la parte superior del cuerpo y los muslos estabilizados por cinturones y cintas de Velcro, los participantes fueron sometidos a pruebas isocinéticas de fuerza de los extensores de rodilla de su pierna dominante (HUMAC NORM, Computer Sports Medicine Inc, Massachusetts, EEUU.). Precedido por 5 contracciones de calentamiento para cada velocidad, se probó la fuerza concéntrica y excéntrica máxima a 60°·sec⁻¹. El torque máximo de tres intentos consecutivos a cada velocidad se utilizó en el análisis estadístico posterior. El torque isométrico máximo de los extensores de rodilla se evaluó en 60° durante 5 segundos (2 intentos; el valor más alto utilizado para el análisis estadístico). Se dio 1 minuto y 30 segundos de descanso entre las pruebas y los calentamientos, respectivamente.

Grosor del Músculo

La evaluación ecográfica se ha realizado siempre antes de cualquier otra prueba y con un mínimo de 24 horas de descanso desde la última sesión de entrenamiento.

Se midió el grosor del músculo vasto lateral (VL) y recto femoral (RF) a partir de ecografías (HL9.0/60/128Z-2, Teleded Ltd Lituania, Echo Wave II, Italia, Milán). Las imágenes se obtuvieron a media distancia entre el trocánter mayor y el cóndilo femoral. Los sitios de escaneo se registraron en papel de acetato para mediciones posteriores. Sin embargo, se tuvo mucho cuidado en igualar los sitios de escaneo pre- y post-intervención ajustando la orientación de la sonda para mostrar puntos de referencia similares (por ejemplo, tejido conectivo y vasos sanguíneos). Todas las imágenes fueron analizadas de forma cegada por el mismo investigador usando ImageJ (Wayne Rasband, National Institutes of Health,

Bethesda, MD). La distancia entre las aponeurosis superficial y profunda se midió en tres sitios diferentes en el tercio medio del ancho del campo de visión. Una media de estas mediciones se utilizó como grosor muscular.

Las mediciones de ultrasonido de la arquitectura muscular han demostrado consistentemente que son válidas [20]. La fiabilidad de las mediciones repetidas con el método actual se ha estimado como aceptable, con un coeficiente de variación del 2,0% [21].

Entrenamiento

Ciclismo Excéntrico o Concéntrico.

Cada sesión comenzó con un calentamiento de 10 minutos a baja intensidad (120-160 W). La Tabla 1 proporciona un resumen del entrenamiento excéntrico y concéntrico, que comenzó a 2 x 2 minutos y progresó a 8 x 2 minutos. Los descansos inter-intervalos fueron siempre de 2 minutos. Los participantes del grupo ECC realizaron su entrenamiento en un Cyclus2 Eccentric Trainer (RBM elektronik-automation GmbH, Leipzig, Alemania), mientras que los del grupo CON utilizaron una Body Bike Classic (BODY BIKE international A/S, Frederikshavn, Dinamarca). El índice del esfuerzo percibido (escala de Borg 6-20) se utilizó para determinar la intensidad durante el ciclismo excéntrico y concéntrico (Tabla 1). Tanto el grupo ECC como el grupo CON pedalearon a una cadencia de 40 RPM. El ergómetro excéntrico mostraba la cadencia, mientras que el grupo CON seguía el ritmo de un metrónomo. En consecuencia, la intensidad se ajustó individualmente con la resistencia. La fuerza media (N), la potencia (W) y la frecuencia cardíaca se registraron durante el ciclismo excéntrico, mientras que sólo se registró la frecuencia cardíaca en el ciclismo concéntrico.

Intervalos Aeróbicos.

La última parte de la sesión de entrenamiento fue igual para todos los participantes y comenzó con un calentamiento progresivo de 10 minutos para prepararse para los intervalos aeróbicos (Tabla 1). Durante estos intervalos aeróbicos, la mayoría de los participantes utilizaron su propia bicicleta en los CompuTrainers (RacerMate Inc, Seattle, Washington, EEUU) con registro de cadencia y potencia, mientras que el resto de los ciclistas completaron los intervalos aeróbicos en una Body Bike Classic. Al final de cada sesión, los participantes recibieron una barrita de proteínas de 29 g ("Big100 bar", Proteinfabrikken, Stokke, Noruega) con fines de recuperación.

Tapering

La última sesión de entrenamiento organizada y la post-prueba estuvieron separadas por 5 días. En este período, los participantes fueron instruidos para realizar tapering con una disminución de 50 por ciento en su volumen de entrenamiento individual [22], y para realizar una sesión de entrenamiento de 5 x 2 minutos de intervalos aeróbicos al 93-98% de la frecuencia cardíaca máxima y 17-18 en la escala de Borg, dos días antes de la post-prueba. El propósito con el tapering era permitir la recuperación y las adaptaciones finales antes de las post-pruebas [23].

Estadísticas

Los datos fueron analizados en una hoja de cálculo diseñada para un ensayo controlado que permite ajustar dos variables predictoras [24]. En todos los análisis, las diferencias en los cambios entre los grupos se ajustaron para el nivel de referencia con el fin de corregir la regresión al efecto medio (aquellos con una puntuación alta en la pre-prueba tienden a debilitarse y aquellos con una puntuación baja en la pre-prueba tienden a mejorar). Además, la hoja de cálculo permite incluir una variable explicativa adicional, e incluimos cambios en el VO₂max e hipertrofia como posibles mediadores que explican las diferencias entre los grupos de entrenamiento. Todos los datos fueron transformados a log y las diferencias entre los grupos se informan como porcentaje con su intervalo de confianza (IC) asociado del 90%.

Los efectos se evaluaron mediante las inferencias clínicas basadas en la magnitud (MBI; [25]), un método particularmente recomendado para muestras pequeñas. La magnitud de una diferencia en la media entre los grupos se evaluó mediante la estandarización, es decir, el cambio medio dividido por las desviaciones estándar (SD) iniciales de todos los sujetos. El efecto estandarizado resultante se evaluó de la siguiente manera: <0,2, trivial; 0,2-0,6, pequeño; 0,6-1,2, moderado; >1,2, grande [25].

Para hacer inferencias clínicas sobre los valores reales de los efectos en la población estudiada, los efectos se expresaron como probabilidades de daño o beneficio en relación con el efecto sustancial más pequeño (0,2 SD; [25]). La proporción de querer usar el entrenamiento experimental corresponde al caso de un efecto que casi con seguridad no es dañino (<0,5% de riesgo de daño) y posiblemente beneficioso (>25% de probabilidad de beneficio). Esto corresponde a un Odds ratio de 66 que, según [24,25], es suficiente para justificar el uso del tratamiento. El efecto se muestra como la diferencia o cambio con la mayor probabilidad, y la probabilidad se muestra cualitativamente usando la siguiente escala: 25-75%, posiblemente; 75-95%, probable; 95-99,5%, muy probable; >99,5%, muy probable [25].

Se realizaron las correlaciones de Pearson entre el cambio de los posibles mediadores (hipertrofia delta y VO2max) y las pruebas de rendimiento entre todos los sujetos. De acuerdo con [25] una correlación $<0,1$ se considera trivial, $0,1-0,3$ pequeña, $0,3-0,5$ moderada y $>0,5$ grande, y sus inferencias fueron evaluadas usando la misma escala que la descrita para los efectos anteriores.

Resultados

El ciclo excéntrico se basó en el esfuerzo percibido (Tabla 1), que resultó en una resistencia durante cada intervalo de 2 minutos de 400 ± 80 N (290 ± 60 W) durante las tres primeras sesiones y 700 ± 90 N (520 ± 70 W) durante las tres últimas sesiones. La frecuencia cardíaca fue de 115 ± 15 latidos por minuto (BPM) y 130 ± 15 BPM durante las tres primeras y últimas sesiones, respectivamente. Para el grupo CON, la frecuencia cardíaca fue de 140 ± 20 BPM durante las tres primeras sesiones y de 150 ± 15 BPM durante las tres últimas sesiones.

La Tabla 2 muestra la media y la SD de todas las variables en los dos grupos al inicio. No se investigó la diferencia entre los grupos al inicio del estudio, porque todos los análisis incluyeron el inicio como una co-variable (controlando las posibles diferencias).

Tabla 2. Estadísticas descriptivas de las principales variables de cada grupo al inicio.

	ECC Mean \pm SD (n = 12)	CON Mean \pm SD (n = 11)
Muscle thickness		
Vastus lateralis (VL; mm)	2.7 \pm 0.4	2.6 \pm 0.3
Rectus femoris (RF; mm)	2.0 \pm 0.3	1.8 \pm 0.2
Mean of RF and VL (mm)	2.3 \pm 0.3	2.2 \pm 0.2
Strength		
Eccentric peak torque at 60°·s ⁻¹ (Nm)	241 \pm 43	265 \pm 52
Eccentric work at 60°·s ⁻¹ (J)	317 \pm 72	317 \pm 66
Eccentric power at 60°·s ⁻¹ (W)	150 \pm 28	160 \pm 28
Eccentric angle at peak torque at 60°·s ⁻¹ (°)	79.8 \pm 11.8	72.9 \pm 11.4
Concentric peak torque at 60°·s ⁻¹ (Nm)	221 \pm 37	229 \pm 33
Concentric work at 60°·s ⁻¹ (J)	278 \pm 51	280 \pm 60
Concentric power at 60°·s ⁻¹ (W)	146 \pm 25	154 \pm 23
Concentric angle at peak torque (°)	63.4 \pm 8.1	64.1 \pm 7.1
Isometric peak torque at 60° (Nm)	242 \pm 41	263 \pm 38
Performance tests		
6-sec sprint mean power (W)	1276 \pm 102	1251 \pm 84
30-sec sprint mean power (W)	776 \pm 62	761 \pm 52
20-min time trial (W)	268 \pm 32	260 \pm 42
20-min time trial (W·kg ⁻¹)	3.6 \pm 0.6	3.4 \pm 0.7
20-min time trial average lactate (mmol·L ⁻¹)	8.5 \pm 1.7	6.6 \pm 1.5
Endurance determinants		
VO _{2max} (ml)	4668 \pm 616	4796 \pm 518
VO _{2max} (ml·kg ⁻¹)	62.1 \pm 10.1	62.0 \pm 9.4
W _{max} (W)	406 \pm 54	383 \pm 36
4 mmol·L ⁻¹ lactate threshold (W·kg ⁻¹)	3.3 \pm 0.7	3.0 \pm 0.8
Cycling economy (W·ml ⁻¹)	16.3 \pm 0.9	16.9 \pm 0.8
Pedaling characteristics		
Pedaling peak torque (N)	69.5 \pm 7.2	69.5 \pm 9.8
Pedaling efficiency (%)	86.4 \pm 3.1	80.6 \pm 8.1
Pedaling average angle (°)	90.2 \pm 5.6	90.3 \pm 5.2
Pedaling min torque (N)	-9.5 \pm 1.3	-12.8 \pm 3.9
Pedaling cadence (RPM)	94.4 \pm 5.6	91.0 \pm 4.8
Training volume last 12 weeks (hours per week)	10 \pm 4	8 \pm 4

CON: Concentric cycling; ECC: Eccentric cycling; RPM: Revolutions per minute.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208452.t002>

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208452.t002>

La Tabla 3 presenta la diferencia porcentual en los cambios medios entre CON y ECC. La columna de la izquierda muestra

los efectos del ECC comparado con el CON cuando sólo se ajusta para el inicio. En general, las diferencias entre los grupos fueron triviales o pequeñas. Hubo un pequeño efecto beneficioso probable del ECC sobre la fuerza excéntrica en comparación con el CON (fuerza/trabajo/potencia isocinética excéntrica). Además, hubo un pequeño efecto posiblemente claro sobre el cambio en la hipertrofia en el ECC. Para las pruebas de rendimiento, los efectos del ECC fueron en general negativos pequeños o triviales, con claros efectos negativos en la prueba crono de 20 minutos, Wmax y la media del torque máximo y del ángulo de pedaleo.

Tabla 3. *Diferencia porcentual en los cambios entre grupos con inferencias basadas en la magnitud cuando se ajusta al inicio y al cambio en VO2max, o cuando se ajusta al inicio y al cambio en el volumen muscular.*

	Diff ECC-CON adjusted for baseline		Diff ECC-CON adj for baseline and delta VO _{2max}		Diff ECC-CON adj for baseline and delta hypertrophy	
	Mean diff ± 90% CI	Inference	Mean diff ± 90% CI	Inference	Mean diff ± 90% CI	Inference
Muscle thickness						
Vastus lateralis (VL; mm)	2.6 ± 5.2	small ^{unclear}	4.8 ± 6.7	small ^{unclear}		
Rectus femoris (RF; mm)	2.6 ± 3.8	small ^{unclear}	5.5 ± 6.1	small ^{unclear}		
Mean of RF and VL (mm)	2.3 ± 2.5	small*	4.3 ± 3.4	small**		
Strength						
Eccentric peak torque at 60°·s ⁻¹ (Nm)	8.8 ± 5.9	small**	11.6 ± 9.4	small**	12.6 ± 9.9	small**
Eccentric work at 60°·s ⁻¹ (J)	5.4 ± 7.1	small ^{unclear}	7.7 ± 10.5	small ^{unclear}	16.9 ± 8.9	mod***
Eccentric power at 60°·s ⁻¹ (W)	8.2 · 10.2	small ^{unclear}	9.2 ± 13.5	small ^{unclear}	35.8 ± 13.6	large****
Eccentric angle at peak torque at 60°·s ⁻¹ (°)	-2.7 ± 6.8	triv ⁺	-0.4 ± 11.2	triv ^{unclear}	-8.7 ± 12.0	small**
Concentric peak torque at 60°·s ⁻¹ (Nm)	-3.1 ± 6.2	triv ⁺	-3.8 ± 9.5	small*	-9.0 ± 7.5	small**
Concentric work at 60°·s ⁻¹ (J)	-2.5 ± 5.9	triv ⁺	-4.5 ± 7.3	small*	-5.8 ± 8.5	small*
Concentric power at 60°·s ⁻¹ (W)	-1.9 ± 5.8	triv ⁺	-2.8 ± 7.7	triv ⁺	-5.3 ± 9.1	small*
Concentric angle at peak torque (°)	-0.7 ± 5.6	triv ⁺	5.4 ± 7.1	small ^{unclear}	0.2 ± 8.4	triv ^{unclear}
Isometric peak torque at 60° (Nm)	3.2 ± 8.9	triv ^{unclear}	13.4 ± 12.6	mod ^{unclear}	8.1 ± 15.0	small ^{unclear}
Performance tests						
6-sec sprint mean power (W)	0.9 ± 5.0	triv ^{unclear}	0.9 ± 6.1	triv ^{unclear}	3.6 ± 8.5	small ^{unclear}
30-sec sprint mean power (W)	-0.6 ± 2.5	triv ⁺	1.9 ± 3.8	small ^{unclear}	-0.3 ± 3.1	triv ⁰
20-min time trial (W)	-3.5 ± 3.8	small ⁺	-3.2 ± 6.4	small ⁺	-4.2 ± 4.6	small ⁺
20-min time trial (W·kg ⁻¹)	-2.3 ± 3.9	triv ⁰⁰	-2.5 ± 6.7	triv ⁺	-3.2 ± 4.8	triv ⁺
20-min time trial average lactate (mmol·L ⁻¹)	3.3 ± 22.1	triv ^{unclear}	-7.8 ± 26.2	small ⁺	-1.0 ± 24.3	triv ^{unclear}
Endurance determinants						
VO _{2max} (ml)	-1.6 ± 2.9	triv ⁺			-0.7 ± 3.8	triv ⁰
VO _{2max} (ml·kg ⁻¹)	0.0 ± 3.2	triv ⁰⁰			2.8 ± 4.1	triv ^{unclear}
W _{max} (W)	-3.0 ± 2.9	small ⁺			-1.7 ± 3.3	triv ⁺
4 mmol·L ⁻¹ lactate threshold (W·kg ⁻¹)	-0.9 ± 5.0	triv ⁰⁰	-0.3 ± 8.9	triv ⁰	0.7 ± 5.3	triv ⁰⁰
Cycling economy (W·ml ⁻¹)	0.3 ± 3.8	triv ^{unclear}	0.1 ± 5.1	triv ^{unclear}	-0.9 ± 5.1	triv ⁺
Pedaling characteristics						
Pedaling peak torque (N)	-5.9 ± 8.2	small**	2.9 ± 12.4	small ^{unclear}	-6.7 ± 9.5	small**
Pedaling efficiency (%)	-1.1 ± 3.5	triv ⁺	0.6 ± 4.6	triv ^{unclear}	-0.7 ± 3.7	triv ⁺
Pedaling average angle (°)	-2.7 ± 3.4	small**	-1.7 ± 5.2	small ⁺	-1.8 ± 4.5	small ⁺
Pedaling min torque (N)	1.1 ± 18.7	triv ^{unclear}	-7.7 ± 25.6	small ⁺	-3.4 ± 18.0	triv ⁺
Pedaling cadence (RPM)	0.4 ± 3.9	triv ^{unclear}	-4.2 ± 4.9	mod**	-0.8 ± 4.5	triv ⁺

Magnitude thresholds (for mean change divided by baseline SD of the total sample): <0.20, trivial; 0.20–0.59, small; 0.60–1.19, moderate; >1.20, large.

Asterisks indicate effects clear at the 5% level and likelihood that the true effect is substantial or trivial, as follows

*possible

**likely

***very likely

****most likely.

*possibly harmful

**likely harmful.

⁰possibly trivial

⁰⁰likely trivial.

CI: Confidence intervals; CON: Concentric cycling; ECC: Eccentric cycling; RPM: Revolutions per minute.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208452.t003>

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208452.t003>

La columna central (Tabla 3) muestra la diferencia en la media cuando se ajusta para el inicio y el cambio en VO_{2max}, lo que significa que el delta de VO_{2max} entre grupos se mantiene constante (ajustado a cero). Este enfoque mostró resultados generales similares a los del ajuste al inicio, pero la fuerza concéntrica (torque y trabajo máximo), el lactato sanguíneo promedio durante la prueba crono de 20 minutos, el torque mínimo de pedaleo y las RPM de pedaleo se volvieron pequeños y claramente negativos para el ECC.

La columna derecha (Tabla 3) muestra el efecto del ECC (comparado con el CON) cuando se ajusta para el inicio y la hipertrofia (media de VL y RF). Las diferencias en las pruebas de rendimiento seguían siendo negativas y triviales o

pequeñas (20 minutos en W, posiblemente dañinas). En todo caso, las diferencias entre el ECC y el CON en las pruebas de rendimiento se hicieron mayores cuando se controló el cambio en la hipertrofia, lo que indica que el efecto de la hipertrofia en el rendimiento del ciclismo fue negativo para el grupo ECC.

Los efectos del cambio en los posibles mediadores, VO₂max e hipertrofia, sobre las diferencias entre los dos grupos se presentan en la Tabla 4. En general, los efectos de los mecanismos fueron triviales o pequeños y poco claros. Sin embargo, para el cambio en el VO₂max hubo algunos efectos claramente negativos del grosor del músculo VL, la potencia media del sprint de 30 segundos, el torque máximo de pedaleo, la eficiencia mecánica de pedaleo, el ángulo concéntrico del torque máximo y el torque máximo isométrico, lo que indica que los aumentos en el VO₂max en ECC influyeron negativamente en estos resultados en comparación con CON.

Tabla 4. Efecto porcentual del cambio en el VO₂max y el cambio en la hipertrofia (mediadores) sobre la diferencia entre los grupos.

	Effect of delta VO _{2max}		Effect of delta hypertrophy	
	Mean diff ± 90% CI	Inference	Mean diff ± 90% CI	Inference
Muscle thickness				
Vastus lateralis (VL; mm)	-1.4 ± 4.2	triv ⁺		
Rectus femoris (RF; mm)	-2.7 ± 3.7	small [*]		
Mean of RF and VL (mm)	-1.6 ± 2.0	triv ⁺		
Strength				
Eccentric peak torque at 60°·s ⁻¹ (Nm)	-2.5 ± 5.9	triv ⁺	-1.8 ± 4.8	triv ⁰⁰
Eccentric work at 60°·s ⁻¹ (J)	-1.9 ± 6.4	triv ⁰	-7.2 ± 4.5	small ⁺⁺
Eccentric power at 60°·s ⁻¹ (W)	-0.5 ± 8.0	triv ⁰	-13.6 ± 5.1	mod ⁺⁺⁺
Eccentric angle at peak torque at 60°·s ⁻¹ (°)	-2.3 ± 8.1	triv ⁺	4.7 ± 7.6	small ^{unclear}
Concentric peak torque at 60°·s ⁻¹ (Nm)	0.2 ± 6.8	triv ⁰	5.8 ± 5.6	small ^{**}
Concentric work at 60°·s ⁻¹ (J)	1.8 ± 4.9	triv ⁰⁰	3.1 ± 5.5	triv ^{unclear}
Concentric power at 60°·s ⁻¹ (W)	0.4 ± 5.2	triv ⁰⁰	3.1 ± 5.9	triv ^{unclear}
Concentric angle at peak torque (°)	-5.1 ± 4.1	small ^{**}	-1.4 ± 5.0	triv ⁺
Isometric peak torque at 60° (Nm)	-9.0 ± 7.1	small ^{**}	-3.4 ± 7.8	triv ⁺
Performance tests				
6-sec sprint mean power (W)	0.8 ± 3.7	triv ^{unclear}	-2.5 ± 4.8	small ⁺
30-sec sprint mean power (W)	-1.5 ± 2.3	small [*]	-1.3 ± 3.1	triv ⁺
20-min time trial (W)	-0.4 ± 5.2	triv ⁰	-1.0 ± 2.4	triv ⁰⁰
20-min time trial (W·kg ⁻¹)	0.2 ± 5.9	triv ⁰	-1.1 ± 2.8	triv ⁰⁰
20-min time trial average lactate (mmol·L ⁻¹)	11.3 ± 20.6	small ^{unclear}	8.3 ± 13.2	small ⁺
Endurance determinants				
VO _{2max} (ml)			-1.4 ± 2.1	triv ⁰⁰
VO _{2max} (ml·kg ⁻¹)			-2.5 ± 2.4	triv ⁺
W _{max} (W)			-2.3 ± 1.8	triv ⁺
4 mmol·L ⁻¹ lactate threshold (W·kg ⁻¹)	-0.6 ± 6.8	triv ⁰⁰	-4.5 ± 3.2	triv ⁺
Cycling economy (W·ml ⁻¹)	0.2 ± 3.0	triv ^{unclear}	1.1 ± 2.3	triv ^{unclear}
Pedaling characteristics				
Pedaling peak torque (N)	-8.2 ± 7.5	mod ⁺⁺	-0.3 ± 4.9	triv ⁰
Pedaling efficiency (%)	-1.8 ± 3.2	small [*]	-0.6 ± 1.6	triv ⁰⁰
Pedaling average angle (°)	-1.1 ± 3.7	triv ⁺	-0.6 ± 2.3	triv ⁺
Pedaling min torque (N)	9.4 ± 22.4	small ^{unclear}	5.7 ± 8.1	triv ^{unclear}
Pedaling cadence (RPM)	3.9 ± 3.2	mod ^{unclear}	0.9 ± 1.9	triv ^{unclear}

Magnitude thresholds (for mean change divided by baseline SD of the total sample): <0.20, trivial; 0.20–0.59, small; 0.60–1.19, moderate; >1.20, large.

Asterisks indicate effects clear at the 5% level and likelihood that the true effect is substantial or trivial, as follows

**likely.

*possibly harmful

**likely harmful

***very likely harmful.

⁰possibly trivial

⁰⁰likely trivial.

CI: Confidence intervals; CON: Concentric cycling; ECC: Eccentric cycling; RPM: Revolutions per minute.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208452.t004>

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208452.t004>

Para la hipertrofia, hubo algunos efectos negativos claros en la potencia media del sprint de 6 segundos, el trabajo y la potencia excéntricos, lo que indica que el aumento de la hipertrofia tuvo efectos negativos en el ECC en comparación con el CON (Tabla 4).

Incluyendo a todos los participantes (n = 23), hubo grandes correlaciones claras entre el cambio en la hipertrofia (RF+VL) y el cambio en el Wmax (0,62, muy probablemente positivo) y el cambio en W·kg⁻¹ a 4 mmol·L⁻¹ [La-]b (0,56, muy probablemente positivo), y una correlación moderada con el W·kg⁻¹ promedio durante la prueba crono de 20 minutos (0,48, muy probablemente positivo).

Discusión

En el presente estudio, se planteó la hipótesis de que el ciclismo excéntrico de baja cadencia induciría más hipertrofia muscular en los extensores de rodilla que el esfuerzo percibido en el ciclismo concéntrico de baja cadencia, y que esta hipertrofia muscular se traduciría en un mejor rendimiento del ciclismo en ciclistas amateur. Los principales hallazgos fueron: 1) la hipertrofia inducida por el ciclismo excéntrico del vasto lateral y el recto femoral, 2) el ciclismo excéntrico resultó en una mejor fuerza isocinética excéntrica, que no se transfirió a la fuerza isocinética concéntrica ni al rendimiento de la carrera de ciclismo, 3) el ciclismo excéntrico cambió las características de pedaleo por un torque máximo más bajo y más temprano durante la carrera de pedaleo y 4) el ciclismo excéntrico demostró los posibles efectos desfavorables sobre el W_{max} y el rendimiento de la prueba crono de 20 minutos.

Ciclismo Excéntrico e Hipertrofia

El ejercicio excéntrico se ha defendido durante años por inducir la hipertrofia y la fuerza [9,26,27], y el ciclismo excéntrico parece ser un modo viable de ejercicio para este propósito [10,28,29]. En el presente estudio, se observó un aumento del grosor del vasto lateral y el recto femoral. Sin embargo, la hipertrofia fue (con una probabilidad entre incierta y probable) de pequeña magnitud en comparación con otros estudios que investigaron el ejercicio de fuerza en general (~3% en el presente estudio versus 6-9% según lo resumido por Wernbom et al. [30]). Rønnestad et al. [31] informaron una hipertrofia del cuádriceps que se tradujo en un aumento del 0,05% en el área de sección transversal (CSA) por día en ciclistas bien entrenados, lo cual es cercano al 0,04% en el grosor muscular en el presente estudio (asumiendo que los cambios en el grosor y el CSA son comparables [30,32,33]). Sin embargo, al comparar nuestros resultados con los regímenes de entrenamiento excéntrico puro, nuestras observaciones están dentro del rango (0,03-0,09%) de las observaciones resumidas por Wernbom et al. [30]. Curiosamente, Leong et al. [13] informaron una hipertrofia muscular muy grande del vasto lateral y el recto femoral (13 y 24%, respectivamente) después de sólo 8 semanas de ciclismo excéntrico (es decir, un aumento de 0,2-0,4% por día). Esta discrepancia puede atribuirse a la falta de entrenamiento de los participantes reclutados por Leong et al., en contraste con los ciclistas entrenados del presente estudio. De hecho, nuestros participantes parecían tener un mayor grosor muscular del vasto lateral al inicio que los participantes en el estudio de Leong et al. (~27 versus ~20 mm, respectivamente); y por lo tanto se podía esperar una hipertrofia atenuada [15]. Años de ciclismo en carretera pueden, de hecho, inducir hipertrofia muscular *per se* [34].

Las razones de los modestos efectos sobre el grosor muscular en nuestros ciclistas después del ciclismo excéntrico no se pueden determinar con el diseño y los métodos aplicados, pero vale la pena mencionar a algunos de los posibles responsables. En primer lugar, el ejercicio excéntrico se llevó a cabo en una bicicleta común, lo que significó que el deportista tuvo que utilizar una fuerza considerable de la parte superior del cuerpo para mantener una posición de ciclismo sentado durante el ejercicio. Por el contrario, cuando se utiliza una bicicleta reclinada, típicamente utilizada para el ciclismo excéntrico (véase: [13,14,35]), la estabilización obtenida del apoyo de la espalda facilita la generación de fuerza excéntrica contra los pedales. En otras palabras, la hipertrofia muscular en el presente estudio fue posiblemente limitada por un estímulo de carga sub-óptimo. Además, las sesiones de ejercicio excéntrico fueron seguidas inmediatamente por una sesión de ciclismo aeróbico. Durante el entrenamiento concurrente, está bien establecido que el ejercicio aeróbico puede dificultar la respuesta de la hipertrofia al ejercicio de fuerza, especialmente cuando los ejercicios aeróbicos y de fuerza se realizan con poco descanso entre medio, como en el presente estudio [6,36]. Curiosamente, los análisis estadísticos con cambios en el VO_{2max} como mediador revelaron que el VO_{2max} aumentaba a expensas del grosor del músculo vasto lateral, del torque máximo de pedaleo y de la eficacia mecánica. Se combinaron los modos de entrenamiento para adaptar la intervención a los regímenes de entrenamiento de los participantes; sin embargo, probablemente se podrían haber obtenido mejores resultados separando el entrenamiento excéntrico del entrenamiento aeróbico de resistencia y/o aplicando un enfoque de periodización por bloques [37].

Ciclismo Excéntrico y Rendimiento del Ciclismo

De acuerdo con nuestra hipótesis, se observó hipertrofia después del ciclismo excéntrico, pero no se observaron beneficios en las pruebas de ciclismo. Es posible que la respuesta de la hipertrofia fuera demasiado pequeña para resultar en mejoras en el rendimiento. Vikmoen et al. [4] observaron un aumento del cuádriceps de ~7% del CSA (versus ~3% en el presente estudio) y una fuerte correlación con la prueba de rendimiento de 40 minutos (watts medios; $r = 0,7$). Curiosamente, cuando se agruparon los grupos, los cambios en la hipertrofia mostraron correlaciones de moderadas a grandes con los cambios en W_{max} , $W \cdot kg^{-1}$ a $4 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ [La-]b y $W \cdot kg^{-1}$ promedio durante la prueba crono de 20 minutos, lo que indica que la hipertrofia es un mecanismo detrás de la mejora en el rendimiento del ciclismo. Es tentador especular si el entrenamiento excéntrico indujo efectos muy específicos de la contracción, que de alguna manera atenuaron o detuvieron la capacidad de los participantes para utilizar el aumento de masa muscular en las pruebas de ciclismo convencionales. De acuerdo con esta sugerencia, estudios anteriores han dado como resultado ninguna o sólo pequeñas mejoras en la fuerza/potencia concéntrica después de 4-8 semanas (2-3 sesiones por semana) de ciclismo excéntrico [13,35,38]. Leong et al. [13] informaron hipertrofia sólida, pero sólo vieron una transferencia menor a la potencia de salida del ciclismo concéntrico una semana después del ciclismo excéntrico. Curiosamente, Leong et al. [13] informaron signos de una respuesta retardada con un gran aumento de la potencia del ciclismo concéntrico 8 semanas después de la intervención de

entrenamiento. Un efecto retardado podría estar relacionado con un proceso prolongado de remodelación/adaptación muscular [13,39], y/o con el tiempo necesario para "calibrar" el sistema neuromuscular a la masa muscular ganada. Desafortunadamente, no pudimos probar a nuestros ciclistas en un momento posterior (por ejemplo, 2 a 4 semanas) después de la intervención, por lo que sólo podemos plantear hipótesis sobre un efecto positivo retardado del ciclismo excéntrico. Cabe destacar que reducimos el volumen de entrenamiento en las dos últimas semanas e incluimos un período de tapering de 5 días después de la última sesión de entrenamiento excéntrico.

Especificidad del Entrenamiento y Posibles Efectos Perjudiciales en el Rendimiento

La especificidad de las mejoras en la fuerza está bien documentada [15], y nuestro resultado confirma una mejora aislada en la fuerza y la potencia excéntricas del entrenamiento excéntrico (por ejemplo, [8,16]). La aplicación de cambios en el grosor muscular como mediador estadístico mostró que la hipertrofia parecía limitar las mejoras en la fuerza excéntrica mientras que facilitaba la fuerza concéntrica. Esto sugiere que el aumento de la fuerza excéntrica se produjo a través de adaptaciones neurales.

Sorprendentemente, el entrenamiento excéntrico pareció inducir algunos efectos limitantes e incluso perjudiciales tanto en las pruebas aisladas de fuerza/potencia concéntrica, como en el rendimiento de la prueba crono de 20 minutos y del Wmax. Los efectos adversos en las pruebas de ciclismo pueden estar relacionados con el hecho de que el entrenamiento excéntrico afectó las características de pedaleo, es decir, un torque máximo más temprano y menor durante la carrera de pedaleo en comparación con el grupo concéntrico. La diferencia de grupo en los cambios de eficiencia mecánica fue trivial, pero también esta variable se inclinó a favor del entrenamiento excéntrico. De manera confusa, se ha observado un torque máximo de pedaleo más temprano después del entrenamiento de fuerza tradicional y se ha asociado positivamente con una mejora en el rendimiento de 40 minutos de ciclismo [39]. Por lo tanto, nuestras observaciones indican que los cambios en el ángulo de torque máximo *per se* tienen un efecto limitado en el rendimiento, al menos cuando se reduce el torque máximo.

En relación con las altas fuerzas mecánicas y los bajos desafíos metabólicos, el ejercicio excéntrico puede estimular preferentemente la hipertrofia de las fibras tipo II y, en algunos casos, incluso aumentar la expresión de IIX [40]. Estas adaptaciones podrían resultar contraproducentes para la resistencia aeróbica y podrían explicar por qué no encontramos ningún efecto beneficioso de los tests que ponen a prueba los sistemas aeróbicos. Por otro lado, si el ciclismo excéntrico estimuló el crecimiento de fibras tipo II concomitante con el aumento de la expresión del tipo de fibra IIX, se podría argumentar que deberíamos haber visto mejoras en las pruebas de ciclismo de velocidad, lo cual no fue así. Sin embargo, un grupo más dominante de fibra tipo II puede haber cambiado la cadencia óptima para la potencia máxima a la derecha [41], y así enmascarar los cambios reales en la potencia máxima de sprint mientras probábamos a nuestros ciclistas con una carga única (y similar) antes y después del período de intervención.

Limitaciones del Estudio

El presente estudio duró sólo 10 semanas y, como se mencionó anteriormente, las fuerzas excéntricas de bajas a moderadas y el entrenamiento concurrente pueden haber restringido la hipertrofia que buscábamos. Además, se comparó el entrenamiento de ciclismo excéntrico con el entrenamiento de ciclismo concéntrico, lo que significa que el grupo de control realizó más entrenamiento aeróbico de resistencia que el grupo de intervención. No medimos el consumo de oxígeno durante el entrenamiento de ciclismo excéntrico, pero sabemos por el extenso trabajo previo que la carga cardiovascular durante el ciclismo excéntrico es baja, incluso con cargas de trabajo muy altas [11,26,42]. Por lo tanto, la menor carga aeróbica del entrenamiento de resistencia en el grupo de intervención podría explicar algunos de los efectos aparentemente adversos del ciclismo excéntrico. Finalmente, nuestros resultados deben ser interpretados con precaución debido al pequeño tamaño de la muestra y a las muchas inferencias. Algunos efectos fueron sustanciales (pequeños), pero no claros, lo que indica que se necesita un tamaño de muestra mayor.

Aplicaciones Prácticas y más Investigación

A pesar de algunas debilidades, nuestro estudio cuestiona el uso del ciclismo excéntrico en ciclistas, ya que observamos la probabilidad de efectos adversos en el rendimiento del ciclismo, lo que contrasta con el entrenamiento de fuerza tradicional [2]. Sin embargo, como el ciclismo excéntrico parece tener muchos beneficios potenciales utilizados tanto en el ámbito clínico como el deportivo [9], es importante seguir investigando este modo de entrenamiento para cada población específica. En cuanto a los ciclistas, sería muy interesante probar los efectos del ciclismo excéntrico en conjunto con los ejercicios tradicionales de entrenamiento de fuerza, como la prensa de piernas y las sentadillas, y/o los ejercicios convencionales de ciclismo de velocidad (por ejemplo, intervalos de 5 a 30 segundos). En este contexto, parece razonable sugerir que los beneficios del estímulo hipertrófico y de los movimientos articulares específicos darían una mejor transferencia al rendimiento del ciclismo.

Conclusión

Aquí se comparó el ciclismo excéntrico de baja cadencia con el esfuerzo percibido en el entrenamiento de ciclismo concéntrico de baja cadencia durante 10 semanas. El ciclismo excéntrico aumenta la fuerza excéntrica y la hipertrofia inducida, incluso cuando se lleva a cabo en concurrencia con el entrenamiento de resistencia aeróbica convencional, en ciclistas amateur entrenados. Aun así, el ciclismo excéntrico no mejoró ninguna medida fisiológica o prueba de rendimiento de ciclismo, incluyendo sprints cortos y una prueba crono de 20 minutos. Por el contrario, el ciclismo excéntrico puede impedir en parte la mejora del rendimiento ciclista, a diferencia del entrenamiento de ciclismo concéntrico. No obstante, las presentes observaciones se obtuvieron inmediatamente después de la intervención de entrenamiento y estudios futuros deberían determinar que no se perdieron los efectos positivos debido al retraso en las adaptaciones.

Agradecimientos

Agradecemos a Hanne B. Eriksen, Maria Moen, Mari M. Dagslet, Merete Nybru, Kristian S. Ankersen, Håkon Thomassen y Aleksander Warming por su gran trabajo durante el muestreo de datos. Además, los autores desean agradecer a Proteinfabrikken A/S por haber proporcionado al proyecto barras de chocolate con proteínas.

REFERENCIAS

1. Aagaard P, Andersen JL (2010). Effects of strength training on endurance capacity in top-level endurance athletes. *Scand J Med Sci Sports* 20 Suppl 2: 39-47. *pmid:20840561*
2. Ronnestad BR, Mujika I (2014). Optimizing strength training for running and cycling endurance performance: A review. *Scand J Med Sci Sports* 24: 603-612. *pmid:23914932*
3. Ronnestad BR, Hansen EA, Raastad T (2011). Strength training improves 5-min all-out performance following 185 min of cycling. *Scand J Med Sci Sports* 21: 250-259. *SMS1035 [pii]; pmid:19903319*
4. Vikmoen O, Ellefsen S, Troen O, Hollan I, Hanestadhaugen M, Raastad T, Ronnestad BR (2016). Strength training improves cycling performance, fractional utilization of VO₂max and cycling economy in female cyclists. *Scand J Med Sci Sports* 26: 384-396. *pmid:25892654*
5. Vikmoen O, Ronnestad BR, Ellefsen S, Raastad T (2017). Heavy strength training improves running and cycling performance following prolonged submaximal work in well-trained female athletes. *Physiol Rep* 5. 5/5/e13149 [pii]; *pmid:28292885*
6. Coffey VG, Hawley JA (2017). Concurrent exercise training: do opposites distract? *J Physiol* 595: 2883-2896. *pmid:27506998*
7. Hather BM, Tesch PA, Buchanan P, Dudley GA (1991). Influence of eccentric actions on skeletal muscle adaptations to resistance training. *Acta Physiol Scand* 143: 177-185. *pmid:1835816*
8. Hortobagyi T, Hill JP, Houmard JA, Fraser DD, Lambert NJ, Israel RG (1996). Adaptive responses to muscle lengthening and shortening in humans. *J Appl Physiol* 80: 765-772. *pmid:8964735*
9. Isner-Horobeti ME, Dufour SP, Vautravers P, Geny B, Coudeyre E, Richard R (2013). Eccentric exercise training: modalities, applications and perspectives. *Sports Med* 43: 483-512. *pmid:23657934*
10. Vogt M, Hoppeler HH (2014). Eccentric exercise: mechanisms and effects when used as training regime or training adjunct. *J Appl Physiol* (1985). 116: 1446-1454. *jappphysiol.00146.2013 [pii]; pmid:24505103*
11. Abbott BC, Bigland B, Ritchie JM (1952). The physiological cost of negative work. *J Physiol* 117: 380-390. *pmid:14946742*
12. Friden J, Sjøstrom M, Ekblom B (1983). Myofibrillar damage following intense eccentric exercise in man. *Int J Sports Med* 4: 170-176. *pmid:6629599*
13. Leong CH, McDermott WJ, Elmer SJ, Martin JC (2014). Chronic eccentric cycling improves quadriceps muscle structure and maximum cycling power. *Int J Sports Med* 35: 559-565. *pmid:24234011*
14. Gross M, Luthy F, Kroell J, Muller E, Hoppeler H, Vogt M (2010). Effects of eccentric cycle ergometry in alpine skiers. *Int J Sports Med* 31: 572-576. *pmid:20464646*
15. Sale DG (1988). Neural adaptation to resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 20: S135-S145. *pmid:3057313*
16. Hortobagyi T, Barrier J, Beard D, Braspeninx J, Koens P, Devita P, Dempsey L, Lambert J (1996). Greater initial adaptations to submaximal muscle lengthening than maximal shortening. *J Appl Physiol* 81: 1677-1682. *pmid:8904586*
17. Baroni BM, Geremia JM, Rodrigues R, De Azevedo FR, Karamanidis K, Vaz MA (2013). Muscle architecture adaptations to knee extensor eccentric training: rectus femoris vs. vastus lateralis. *Muscle Nerve* 48: 498-506. *pmid:23852989*
18. Franchi MV, Atherton PJ, Reeves ND, Fluck M, Williams J, Mitchell WK, Selby A, Beltran Valls RM, Narici MV (2014). Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle. *Acta Physiol (Oxf)*. 210: 642-654. *pmid:24387247*
19. De Pauw K, Roelands B, Cheung SS, de GB, Rietjens G, Meeusen R (2013). Guidelines to classify subject groups in sport-science research. *Int J Sports Physiol Perform* 8: 111-122. *pmid:23428482*
20. Kwah LK, Pinto RZ, Diong J, Herbert RD (2013). Reliability and validity of ultrasound measurements of muscle fascicle length and pennation in humans: a systematic review. *J Appl Physiol* (1985). 114: 761-769. *jappphysiol.01430.2011 [pii]; pmid:23305989*
21. Luteberget LS, Raastad T, Seynnes O, Spencer M (2015). Effect of traditional and resisted sprint training in highly trained female team handball players. *Int J Sports Physiol Perform* 10: 642-647. 2014-0276 [pii]; *pmid:25569506*
22. Bosquet L, Montpetit J, Arvisais D, Mujika I (2007). Effects of tapering on performance: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* 39:

- 1358-1365. 00005768-200708000-00019 [pii]. pmid:17762369
23. Pyne DB, Mujika I, Reilly T (2009). Peaking for optimal performance: Research limitations and future directions. *J Sports Sci* 27: 195-202. 907909811 [pii]; pmid:19153861
 24. Hopkins WG (2017). Spreadsheets for analysis of controlled trials, crossovers and time series. *Sport Science* 21: 1-4.
 25. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc* 41: 3-13. pmid:19092709
 26. Evans WJ, Cannon JG (1991). The metabolic effects of exercise-induced muscle damage. *Exerc Sport Sci Rev* 19: 99-125. pmid:1936096
 27. Komi PV, Viitasalo JT (1977). Changes in motor unit activity and metabolism in human skeletal muscle during and after repeated eccentric and concentric contractions. *Acta Physiol Scand* 100: 246-254. pmid:888714
 28. Lastayo PC, Woolf JM, Lewek MD, Snyder-Mackler L, Reich T, Lindstedt SL (2003). Eccentric muscle contractions: their contribution to injury, prevention, rehabilitation, and sport. *J Orthop Sports Phys Ther* 33: 557-571. pmid:14620785
 29. Mujika I, Ronnestad BR, Martin DT (2016). Effects of Increased Muscle Strength and Muscle Mass on Endurance-Cycling Performance. *Int J Sports Physiol Perform* 11: 283-289. pmid:27068517
 30. Wernbom M, Augustsson J, Thomee R (2007). The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans. *Sports Med* 37: 225-264. pmid:17326698
 31. Ronnestad BR, Hansen EA, Raastad T (2010). Effect of heavy strength training on thigh muscle cross-sectional area, performance determinants, and performance in well-trained cyclists. *Eur J Appl Physiol* 108: 965-975. pmid:19960350
 32. Abe T, Kawakami Y, Suzuki Y, Gunji A, Fukunaga T (1997). Effects of 20 days bed rest on muscle morphology. *J Gravit Physiol* 4: S10-S14. pmid:11541170
 33. Franchi MV, Longo S, Mallinson J, Quinlan JI, Taylor T, Greenhaff PL, Narici MV (2018). Muscle thickness correlates to muscle cross-sectional area in the assessment of strength training-induced hypertrophy. *Scand J Med Sci Sports* 28: 846-853. pmid:28805932
 34. Hug F, Marqueste T, Le Fur Y, Cozzone PJ, Grelot L, Bendahan D (2006). Selective training-induced thigh muscles hypertrophy in professional road cyclists. *Eur J Appl Physiol* 97: 591-597. pmid:16767441
 35. Elmer S, Hahn S, McAllister P, Leong C, Martin J (2012). Improvements in multi-joint leg function following chronic eccentric exercise. *Scand J Med Sci Sports* 22: 653-661. pmid:21410545
 36. Murach KA, Bagley JR (2016). Skeletal Muscle Hypertrophy with Concurrent Exercise Training: Contrary Evidence for an Interference Effect. *Sports Med* 46: 1029-1039. [pii]. pmid:26932769
 37. Issurin VB (2013). Training transfer: scientific background and insights for practical application. *Sports Med* 43: 675-694. pmid:23633165
 38. Friden J, Seger J, Sjostrom M, Ekblom B (1983). Adaptive response in human skeletal muscle subjected to prolonged eccentric training. *Int J Sports Med* 4: 177-183. pmid:6629600
 39. Ronnestad BR, Hansen J, Hollan I, Ellefsen S (2015). Strength training improves performance and pedaling characteristics in elite cyclists. *Scand J Med Sci Sports* 25: e89-e98. pmid:24862305
 40. Friedmann-Bette B, Bauer T, Kinscherf R, Vorwald S, Klute K, Bischoff D, Muller H, Weber MA, Metz J, Kauczor HU, Bartsch P, Billeter R (2010). Effects of strength training with eccentric overload on muscle adaptation in male athletes. *Eur J Appl Physiol* 108: 821-836. pmid:19937450
 41. Driss T, Vandewalle H (2013). The measurement of maximal (anaerobic). power output on a cycle ergometer: a critical review. *Biomed Res Int* 2013: 589361. pmid:24073413
 42. Knuttgen HG, Nadel ER, Pandolf KB, Patton JF (1982). Effects of training with eccentric muscle contractions on exercise performance, energy expenditure, and body temperature. *Int J Sports Med* 3: 13-17. pmid:7068291