

Monograph

Efectos del Entrenamiento de Ciclismo de Baja Intensidad con Reducción del Flujo Sanguíneo hacia la Pierna sobre el Volumen Muscular del Muslo y el VO_2 máx en Hombres Jóvenes

Abe Takashi¹, Fujita Satoshi¹, Nakajima Toshiaki², Sakamaki Mikako¹, Ozaki Hayao¹, Ogasawara Riki¹, Sugaya Masato¹, Kudo Maiko³, Kurano Miwa² y Ohshima Hiroshi⁴

¹Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo, Kashiwa, Japan.

²Graduate School of Medicine, University of Tokyo, Tokyo, Japan.

³Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo, Tokyo, Japan.

⁴Japan Aero-space Exploration Agency, Tsukuba, Japan.

RESUMEN

En la actualidad no existen estudios que hayan reportado mejoras simultáneas en la capacidad aeróbica y la hipertrofia en respuesta a una única modalidad de entrenamiento. En el presente estudio se han analizado los efectos del entrenamiento de ciclismo de baja intensidad con y sin restricción del flujo sanguíneo (BFR) sobre el tamaño muscular y el consumo de oxígeno máximo (VO_2 máx). Un grupo de 19 hombres jóvenes (edad media \pm DE: 23.0 \pm 1.7 años) fueron asignados de manera aleatoria a un grupo de entrenamiento BFR (n=9, entrenamiento de BFR) o a un grupo de entrenamiento de control sin BFR (n=10, entrenamiento de CON), ambos entrenaron 3 días a la semana durante 8 semanas. La intensidad y la duración del entrenamiento fueron del 40% del VO_2 máx y 15 min para el grupo de entrenamiento de BFR y del 40% del VO_2 máx y 45 min para el grupo de entrenamiento de CON. El área de sección cruzada muscular del muslo y del cuádriceps medidas por MRI y el volumen muscular aumentaron un 3.4-5.1% ($p < 0.01$) y la fuerza isométrica de extensión de la rodilla tendió a aumentar en un 7.7% ($p < 0.10$) en el grupo de entrenamiento de BFR. No se registraron cambios en el tamaño muscular ($\sim 0.6\%$) ni en la fuerza ($\sim 1.4\%$) en el grupo de entrenamiento de CON. Se observaron mejoras significativas en el VO_2 máx (6.4%) y en el tiempo de ejercicio hasta el agotamiento (15.4%) en el grupo de entrenamiento de BFR ($p < 0.05$), pero no en el grupo de entrenamiento de CON (-0.1 y 3.9%, respectivamente). Los resultados sugieren que el ejercicio de pedaleo de baja intensidad y corta duración combinado con una BFR mejora tanto la hipertrofia muscular como la capacidad aeróbica al mismo tiempo en los hombres jóvenes.

Palabras Clave: hipertrofia muscular, ejercicio aeróbico, oclusión, fuerza muscular

INTRODUCCION

El músculo esquelético muestra una enorme plasticidad para adaptarse a los estímulos tales como las actividades metabólicas y/o contráctiles. Según el principio de especificidad del ejercicio, el ejercicio con sobrecarga genera adaptaciones musculares específicas, con escasa mejora de las adaptaciones fisiológicas experimentadas con el entrenamiento aeróbico habitual (Hurley et al., 1984). Por el contrario, se considera que el entrenamiento aeróbico estimula mejoras en la aptitud cardiovascular, como el consumo de oxígeno máximo ($VO_{2\text{máx}}$) y el umbral anaeróbico (Wenger y Bell, 1986). Dentro del músculo, se producen respuestas adaptativas morfológicas y fisiológicas opuestas a los dos tipos de entrenamiento en el contenido de proteínas miofibrilares (Hoppeler, 1986; Luthi et al., 1986), en la densidad del volumen mitocondrial (Hoppeler, 1986; MacDougall et al., 1979), en la densidad capilar (Denis et al., 1986), en las enzimas que reflejan una producción de energía aeróbica (Gollnick et al., 1973; Tesch et al., 1987), y en la vía de señalización Akt/mTOR (Coffey y Hawley, 2007). Además, algunos estudios (Bell et al., 2000; Kraemer et al., 1995) muestran una interferencia en el desarrollo de la fuerza cuando al entrenamiento con sobrecarga se le agrega un entrenamiento aeróbico. Por lo tanto, sería provechoso desarrollar una modalidad de entrenamiento que pueda mejorar de manera efectiva y simultánea ambas aptitudes cardiovasculares y musculares dentro de una única modalidad de entrenamiento.

Se ha demostrado que la restricción del flujo sanguíneo en el músculo (BFR) durante el entrenamiento con sobrecarga genera una hipertrofia muscular similar a la del entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad habitual, pero con un entrenamiento de intensidad mucho menor (Abe et al., 2005; Takarada et al., 2002). Una intensidad tan baja como la que se asocia a la caminata, al combinarla con una BFR, puede llevar a mejoras significativas en la fuerza muscular y la hipertrofia muscular de la pierna (Abe et al., 2006; 2010). Recientemente, nuestro laboratorio ha demostrado un incremento de la activación muscular durante la realización de concentraciones musculares con cargas bajas (20% de 1 repetición máxima [1 RM]) y BFR tal que hubo una mayor intensidad de activación interna del músculo en relación con la carga externa (Yasuda et al., 2008). Además, se observan un consumo de oxígeno y una frecuencia cardíaca (HR) significativamente mayores durante la caminata lenta en cinta ergométrica con BFR que durante la caminata sin BFR (Abe et al., 2006). Lo novedoso de la BFR parece residir en la combinación única de la acumulación de sangre venosa y la restricción de influjo de sangre arterial, lo cual puede resultar en una reducción del volumen latido y en un incremento de la HR, manteniendo el gasto cardíaco (Takano et al., 2005). Consecuentemente, un incremento en la HR a la misma presión sanguínea sistólica (SBP) durante el ejercicio con BFR puede producir un elevado estrés mecánico sobre el corazón, como lo indica el mayor producto tasa-presión ($[HR \times SBP]/100$) (Nelson et al., 1974). Además, el incremento en el consumo de oxígeno observado durante el ejercicio con BFR puede resultar del incremento en la diferencia arterio-venosa mixta ($a-v O_2$), dado que el gasto cardíaco durante el ejercicio con y sin BFR es el mismo. Se ha planteado la hipótesis de que los beneficios potenciales del ejercicio con BFR podrían incluir no sólo una respuesta anabólica del sistema muscular (Abe et al., 2006) sino también una mejora en la aptitud cardiovascular. Por lo tanto, el propósito del presente estudio ha sido investigar los efectos del entrenamiento de ejercicios de baja intensidad combinado con BFR sobre el tamaño y la fuerza muscular, así como también sobre el $VO_{2\text{máx}}$ en hombres jóvenes.

METODOS

Participantes

Diecinueve hombres jóvenes de entre 20 y 26 años participaron de manera voluntaria en el estudio. A los sujetos se los dividió de manera aleatoria en un grupo de entrenamiento con BFR ($n = 9$, entrenamiento BFR) o en un grupo de entrenamiento de control sin BFR ($n = 10$, entrenamiento CON). Los sujetos de este estudio eran físicamente activos, pero ninguno de los sujetos había participado regularmente en un entrenamiento de fuerza/con sobrecarga/aeróbico (menos de una vez por semana) durante un período mínimo de 1 año antes del comienzo del estudio. A los voluntarios que sufrían de alguna enfermedad crónica, como hipertensión, diabetes, desorden ortopédico, trombosis venosa profunda o enfermedad vascular periférica, se los excluyó del estudio. A todos los sujetos se les informó sobre los métodos, procedimientos y riesgos, y éstos firmaron un consentimiento informado antes de participar. El estudio se llevó a cabo según la Declaración de Helsinki y fue aprobado por el Comité de Revisión Institucional (IRB) para la Investigación con Humanos de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) y por el Comité de Ética para Experimentos con Humanos de la Universidad de Tokio, Japón.

Protocolo de Entrenamiento

El entrenamiento se llevó a cabo una vez al día, 3 días/semana, durante 8 semanas. Después de las mediciones de peso corporal y contorno del muslo medio, los sujetos realizaron el ejercicio en un cicloergómetro con cupla electromagnética (Aerobike 900U, Combi Corporation, Tokyo, Japón) a un 40% del VO_2 máx durante 15 minutos en el grupo de entrenamiento BFR y a un 40% del VO_2 máx durante 45 minutos en el grupo de entrenamiento CON. La intensidad y duración del ejercicio en cada grupo permanecieron constantes a lo largo del período de entrenamiento. Los sujetos del grupo BFR usaron cinturones de presión (Kaatsu-Master, Sato Sports Plaza, Tokio, Japón) en ambas piernas durante el entrenamiento de ciclismo. Antes del entrenamiento BFR, los participantes se sentaron en una silla, se estableció la presión de aire del cinturón en 120 mmHg (la SBD aproximada a nivel del corazón para cada sujeto) durante 30 s, y posteriormente se liberó la presión de aire. La presión de aire se incrementó en 20 mmHg, se mantuvo durante 30 s, y luego se liberó durante 10 s antes de que se realizara la siguiente estimulación oclusiva. Este proceso se repitió hasta que se alcanzó la presión oclusiva final para cada día de entrenamiento. En el primer día de entrenamiento, la presión final del cinturón (presión de entrenamiento) fue de 160 mmHg. Mientras los participantes se adaptaban al estímulo oclusivo durante la fase temprana del entrenamiento, la presión de entrenamiento se incrementó en 10 mmHg cada semana hasta alcanzar una presión final del cinturón de 210 mmHg. Se escogió un cinturón de presión de 160–210 mmHg para el estímulo de restricción en base a una revisión de datos de hombres jóvenes (Abe et al., 2006). El flujo sanguíneo hacia los músculos de las piernas se restringió por un total de ~18 min (3 min de preparación y 15 min de pedaleo) durante cada sesión de entrenamiento, el cinturón de presión se quitaba inmediatamente después de terminada la sesión. Durante todas las sesiones de entrenamiento, la HR se registró en el 5^o min y el 15^o min para el grupo BFR y el grupo CON, respectivamente. También se registraron los valores de esfuerzo percibido (escala de 15 puntos de Borg) al final de la sesión de entrenamiento.

Volumen y Área de Sección Cruzada Muscular medida por MRI

Se obtuvieron múltiples imágenes de cortes por MRI del muslo utilizando un escáner General Electric Signa 1.5-T (Milwaukee, WI). Se llevó a cabo una secuencia de *spin-eco* ponderada para T1 en plano axial con un tiempo de repetición de 1.500 ms. Y un tiempo de eco de 17 ms (Figura 1). Los participantes descansaron tranquilamente en una placa magnética en posición supina con las piernas extendidas. El *trocánter mayor* se utilizó como punto de origen, y se obtuvieron imágenes transversales continuas con un grosor de corte de 1.0 cm (espacio inter-corte de 0 cm) desde el trocánter mayor hasta el cóndilo lateral del fémur para cada participante.

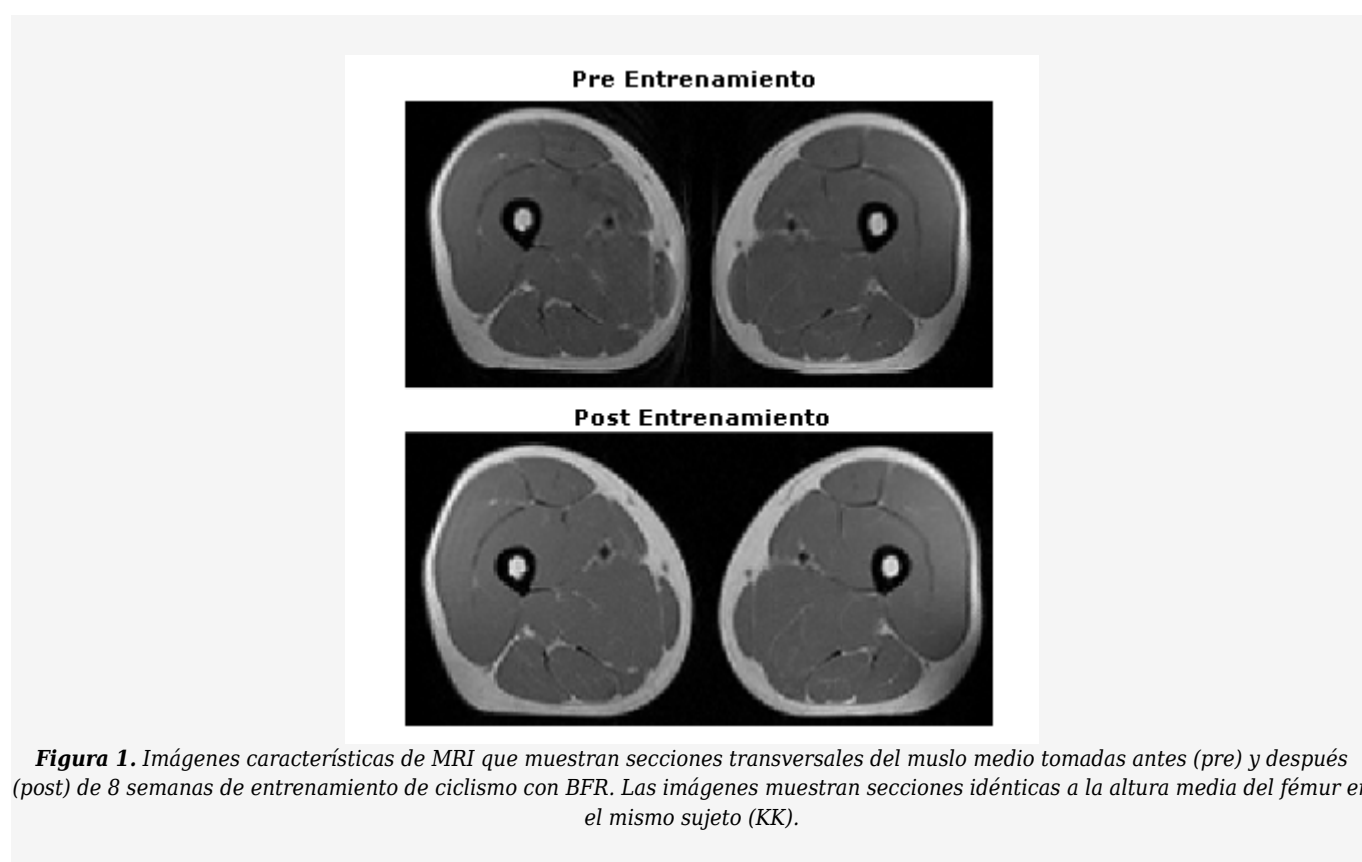


Figura 1. Imágenes características de MRI que muestran secciones transversales del muslo medio tomadas antes (pre) y después (post) de 8 semanas de entrenamiento de ciclismo con BFR. Las imágenes muestran secciones idénticas a la altura media del fémur en el mismo sujeto (KK).

Todos los datos de la MRI se transfirieron a una computadora para ser analizados utilizando un programa de análisis de

imágenes especialmente diseñado (TomoVision Inc., Montreal, Canadá). Para cada corte, se digitalizó el área de sección cruzada del tejido del músculo esquelético (CSA), y se calculó el volumen de tejido muscular (cm^3) por corte multiplicando el área de tejido muscular (cm^2) por el grosor del corte (cm). El volumen muscular de un músculo individual se definió como la suma de los cortes del músculo. Con anterioridad se determinó que el coeficiente de variación (CV) de esta medición era menor al 1% (Abe et al., 2003). Esta medición, desde el lado derecho del cuerpo, se completó en valores iniciales y 3 días después del entrenamiento final (post-pruebas).

Fuerza Isométrica Máxima

La fuerza isométrica máxima voluntaria de los extensores de la rodilla se determinó utilizando un dinamómetro Biodex System 3 (Shirley, NY). Los sujetos realizaron un cuidadoso proceso de familiarización con los procedimientos de evaluación de la producción voluntaria máxima de fuerza de los músculos del muslo realizando varias contracciones submáximas y máximas ~1 semana antes de los tests iniciales. Los participantes se sentaron en una silla con el ángulo de la articulación de la cadera a 85° . El centro de rotación de la articulación de la rodilla se alineó visualmente con el eje del brazo de palanca del dinamómetro, y el tobillo de la pierna derecha se ajustó con firmeza al brazo de palanca del dinamómetro con una correa. Después de una entrada en calor que consistió de contracciones submáximas, a los sujetos se les ordenó que realizaran extensiones isométricas máximas de rodilla (MVC) a un ángulo de articulación de la rodilla de 75° y flexiones isométricas máximas de rodilla a un ángulo de 60° . Un ángulo de articulación de la rodilla de 0° correspondía a una extensión completa de la rodilla (Abe et al., 2000). Si la fuerza de MVC para los dos primeros intentos variaba en más de un 5%, se realizaba una MVC adicional. El coeficiente de variación para este test en el laboratorio fue de 7%. El test fue llevado a cabo inicialmente y a los 3 días posteriores a la última sesión de entrenamiento (post-entrenamiento).

Consumo Máximo de Oxígeno

Los tests de ejercicio progresivo se llevaron a cabo en el laboratorio utilizando un cicloergómetro con cupla electromagnética (Aerobike 75XL-II, Combi Corporation, Tokyo, Japón), donde la temperatura ambiente estaba estabilizada en $20\text{--}22^\circ\text{C}$. En el test inicial, se registró la altura del asiento y se utilizó la misma altura para los tests post-entrenamiento. El test de ejercicio comenzó con una carga de trabajo inicial de 50 W, la cual se incrementó en 15 W a cada minuto hasta llegar al agotamiento voluntario. (Si la carga de trabajo alcanzaba 200 W, el índice de incremento era de 10 W por minuto). Durante el test, se monitoreó la HR de manera continua (monitor de HR, Minato Medical Science Co., Ltd., Osaka, Japón). También se monitoreó la ventilación; y las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono en el aire espirado se midieron de manera continua para calcular el consumo de oxígeno (O_2), la producción de dióxido de carbono (CO_2) y el índice de intercambio de gas respiratorio (RER; CO_2/O_2) mediante un sistema calibrado respiración por respiración (Aero monitor AE300S, Minato Medical Science Co., Ltd., Osaka, Japón). Para establecer que se había alcanzado el esfuerzo máximo se utilizaron los siguientes criterios: la estabilización del VO_2 a pesar del incremento en la carga de trabajo (incremento del VO_2 de $150 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$), una frecuencia cardíaca máxima dentro de $\pm 11 \text{ latidos}\cdot\text{min}^{-1}$ del máximo estimado para la edad (220 menos la edad) y un índice de intercambio respiratorio máximo por encima de 1.15. También se registró el tiempo de ejercicio hasta el agotamiento para cada sujeto (Ozaki et al., 2010).

Análisis Estadísticos

Para computar los datos se utilizó el software StatView, versión 4.5, y los resultados se expresaron como medias y desviaciones estándar (DE) para todas las variables. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo mediante un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías para medidas repetidas (Grupo [entrenamiento BFR y entrenamiento CON] \times Tiempo [pre y pos test]) a fin de evaluar los efectos de entrenamiento para todas las variables dependientes. Cuando fue apropiado, se utilizaron pruebas *t post-hoc* para datos apareados a fin de evaluar los cambios dentro del grupo. Todas las características de los valores iniciales y los cambios de porcentaje en las variables antropométricas, el volumen de músculo esquelético y el CSA, la fuerza muscular y la capacidad aeróbica se compararon entre los grupos con un ANOVA de una vía. La significancia estadística se estableció en $p < 0.05$.

RESULTADOS

En los valores iniciales, no se hallaron diferencias entre los dos grupos respecto de la talla de pie, el peso corporal, el índice de masa corporal (IMC), y el contorno del muslo medio (Tabla 1). Los sujetos de ambos grupos de entrenamiento completaron todas las sesiones de entrenamiento y evaluación, y no sufrieron lesiones relacionadas con el entrenamiento. No hubo cambios significativos en el peso corporal ni el IMC en ninguno de los grupos después del programa de entrenamiento; no obstante, el contorno del muslo medio aumentó ($p < 0.05$) en el grupo de BFR, pero no en el grupo CON

(Tabla 1).

	Grupo Entrenamiento BFR			Grupo Entrenamiento CON		
	Pre	Post	%Δ	Pre	Post	%Δ
Variables antropométricas						
Talla (m)	1.72 (.07)			1.71 (.04)		
Peso (kg)	61.1 (8.4)	62.0 (9.0)	1.4	61.7 (6.3)	61.4 (6.1)	-0.4
IMC (kg·m ⁻²)	21.2 (2.5)	21.5 (2.5)	1.4	21.0 (2.4)	20.9 (2.3)	-0.4
Contorno del muslo (cm)	49.7 (3.1)	50.5 (3.0) ^a	1.7 ^a	50.0 (3.9)	49.7 (3.6)	-0.6
Área de Sección Cruzada Muscular, cm²						
Muslo al 50%	142.3(8.7)	147.1 (9.2) ^f	3.4 ^e	144.0 (17.6)	144.1 (15.0)	0.1
Cuadriceps al 50%	69.5 (5.4)	72.6 (5.3) ^f	4.6 ^e	70.7 (7.3)	71.0 (6.5)	0.6
Volumen Muscular, cm³						
Muslo	3508 (283)	3641(320) ^f	3.8 ^e	3696 (447)	3689 (418)	-0.1
Cuadriceps	1575 (153)	1655(132) ^f	5.1 ^e	1730 (190)	1731 (180)	-0.1

Tabla 1. Cambios en las variables antropométricas, en el área de sección cruzada del muslo y en el volumen muscular. Los datos son medias (DE). IMC: Índice de masa corporal. Diferencias significativas entre el grupo de entrenamiento de BFR y el grupo de entrenamiento de CON: ^ap < 0.05, ^bp < 0.01. Diferencias significativas entre pre- y post-entrenamiento: ^ep < 0.05, ^fp < 0.01

	Grupo Entrenamiento BFR			Grupo Entrenamiento CON		
	Pre	Post	%Δ	Pre	Post	%Δ
Fuerza Muscular Isométrica, Nm						
Extensión de rodilla	194 (80)	209 (73)	7.7 ^a	216 (47)	219 (45)	1.4
Flexión de rodilla	77 (26)	79 (27)	3.3	87 (23)	84 (16)	-3.4
Tensión Específica, Nm/cm²						
Extensión de rodilla/qCSA	2.79 (1.08)	2.86 (0.90)	2.5	3.05 (0.51)	3.09 (0.54)	1.3

Tabla 2. Cambios en la fuerza isométrica durante la extensión y la flexión de la rodilla y tensión específica. Los datos son medias (DE). qCSA, área de sección cruzada del músculo cuádriceps (al 50%). Diferencias significativas entre el grupo de entrenamiento de BFR y el grupo de entrenamiento de CON: ^ap < 0.10.

El CSA del músculo aumentó ($p < 0.01$) en un 3.4% para el muslo y 4.6% para el cuádriceps en el grupo de entrenamiento de BFR. Los volúmenes musculares del muslo y cuádriceps aumentaron ($p < 0.01$) en un 3.8 y 5.1%, respectivamente para el grupo de entrenamiento de BFR. Ni el CSA ni el volumen del músculo cambiaron para el grupo de entrenamiento de CON (Tabla 1).

La fuerza isométrica máxima de extensión de rodilla tendió a aumentar ($p < 0.10$) en el grupo de entrenamiento BFR (7.7%), pero no en el grupo de entrenamiento CON (1.4%). No hubo cambios en la fuerza isométrica de flexión de rodilla para ningún grupo (Tabla 2). La fuerza isométrica relativa de extensión de rodilla por unidad de CSA del músculo cuádriceps fue similar entre las evaluaciones pre- y post-entrenamiento en ambos grupos.

Durante las sesiones de entrenamiento, la frecuencia cardíaca (HR) varió entre 129 y 149 latidos·min⁻¹ (50-65% reserva de frecuencia cardíaca [HRR], promedio 59%) para los participantes del entrenamiento BFR, y entre 105 y 141 latidos·min⁻¹ (37-46% HRR, promedio 42%) para los participantes del entrenamiento CON. Los valores de esfuerzo percibido al final de la sesión de entrenamiento fueron más elevados ($p < 0.01$) en el grupo de entrenamiento BFR que en el grupo de entrenamiento CON (10.5 ± 1.4 y 13.6 ± 1.3 , respectivamente). No hubo cambios en la HR máxima obtenida durante el test de ejercicio progresivo en ninguno de los grupos. El VO₂máx absoluto y relativo aumentó en el grupo BFR ($p < 0.05$), pero no cambió en el grupo CON. Se observó un incremento en el tiempo de ejercicio hasta el agotamiento en el grupo BFR (15.4%, $p < 0.01$), pero no en el grupo CON (Figura 2).

DISCUSION

Este estudio demostró que una única modalidad de entrenamiento de ejercicios de baja intensidad (40% del $\text{VO}_2\text{máx}$) y corta duración (15 min) con BFR puede generar mejoras en el volumen muscular en sujetos jóvenes saludables. La capacidad aeróbica también mejoró simultáneamente después del entrenamiento. Estudios previos han observado mejoras simultáneas en la fuerza muscular y la capacidad aeróbica por medio de una única modalidad de ejercicio después de un entrenamiento de alta intensidad y larga duración (Hass et al., 2001; Tabata et al., 1990). Sin embargo, ninguno de los estudios demostró una hipertrofia muscular significativa, lo que sugiere que el incremento en la fuerza se debió principalmente a adaptaciones neurales.

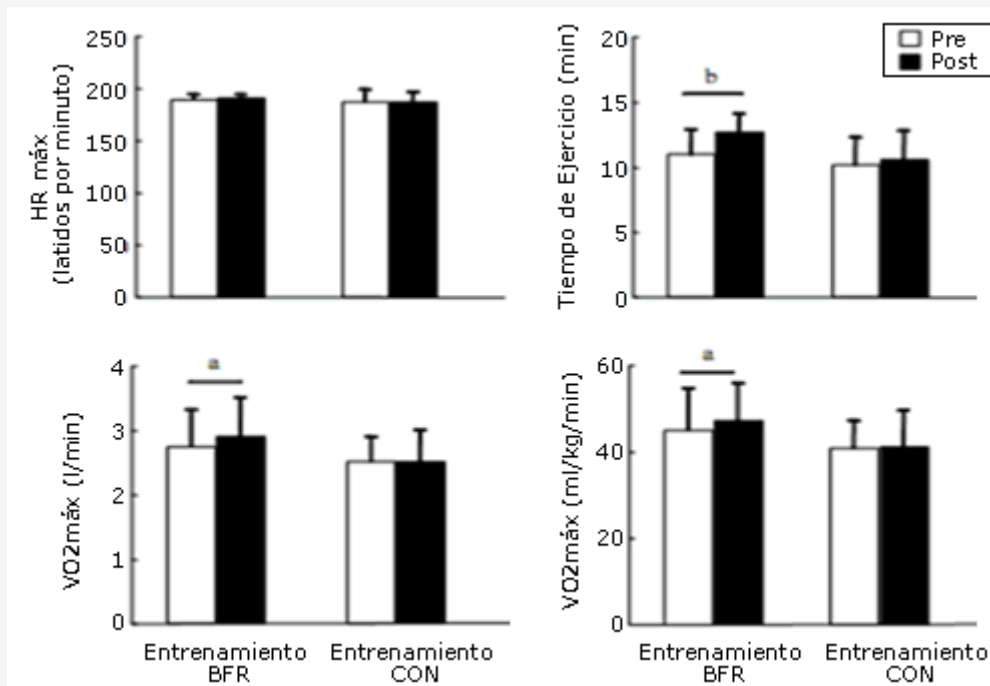


Figura 2. Cambios en el $\text{VO}_2\text{máx}$ (ml/kg/min) absoluto y relativo y en el tiempo de ejercicio hasta el agotamiento. Diferencias significativas entre pre- y post-entrenamiento: ^a $p < 0.05$, ^b $p < 0.01$

Por lo tanto, un entrenamiento de alta intensidad y larga duración rara vez produce una hipertrofia muscular significativa en adultos jóvenes de mediana edad. Además, se ha reportado que la fuerza máxima de extensión de rodilla disminuyó y el área de sección cruzada del músculo del muslo permaneció sin cambios después de 4 semanas de entrenamiento de ciclismo bajo condiciones de isquemia local de la pierna, aunque el $\text{VO}_2\text{máx}$ aumentó con este entrenamiento (Nygren et al., 2000; Sundberg, 1994). No obstante, hay pocos estudios publicados que documenten mejoras simultáneas en el $\text{VO}_2\text{máx}$ y la hipertrofia muscular después del entrenamiento aeróbico en sujetos mayores evaluados (Harber et al., 2009; Schwartz et al., 1991).

Estudios previos (Bell et al., 2000; Kraemer et al., 1995) han demostrado que la combinación de entrenamiento aeróbico con ejercicios con sobrecarga afectaba de manera negativa la hipertrofia muscular inducida por el entrenamiento con sobrecarga. Por ejemplo, Bell et al (2000) reportaron que el CSA de las fibras musculares tipo I y tipo II aumentó (27% y 28%, respectivamente) después de 12 semanas de entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad (HI-RT), pero la magnitud del incremento en el CSA de la fibra en el grupo que realizó entrenamiento concurrente de la fuerza y la resistencia fue menor a la mitad del que se produjo con un entrenamiento con sobrecarga únicamente (10% y 14%, respectivamente). En el presente estudio, los incrementos en el CSA del muslo y del cuádriceps (4.1% y 5.1%, respectivamente) y el volumen muscular (3.2 y 5.3%, respectivamente) fueron similares a los incrementos observados en estudios previos de HI-RT (Jones y Rutherford, 1987; Wilkinson et al., 2006), pero menores que los observados en estudios que incluyeron programas de HI-RT de corta duración (5 semanas) (Seynnes et al., 2007; Tesch et al., 2004). Aunque las diferencias en la modalidad, la intensidad y el volumen de ejercicios podrían haber causado la variabilidad en la hipertrofia

muscular inducida por el entrenamiento, queda claro que la magnitud del potencial hipertrófico asociado al entrenamiento de ciclismo con BFR se puede comparar con la que se asocia al HI-RT.

Un estudio previo (Abe et al., 2006) demostró que el entrenamiento de caminata lenta combinado con BFR no sólo produjo la hipertrofia muscular del muslo sino que también incrementó la fuerza isométrica y dinámica del extensor de la rodilla. McCarthy et al. (1995) reportaron que el entrenamiento de ciclismo por sí solo no produjo cambios significativos en la fuerza isocinética o isométrica, hallazgo que coincide con los resultados del grupo CON del presente estudio. Por otro lado, se observó un incremento promedio del 7.7% en la fuerza de extensión de la rodilla cuando el ciclo de entrenamiento se combinó con BFR. Sin embargo, hubo grandes variaciones individuales en la adaptación de la fuerza en respuesta al entrenamiento de pedaleo con BFR, lo cual dio como resultado un incremento no significativo en la fuerza isométrica de extensión de la rodilla. La tensión específica del músculo extensor de la rodilla no cambió de manera significativa entre el pre- y post-entrenamiento utilizando un entrenamiento de BFR con sobrecarga (Takarada et al., 2002) y un entrenamiento de BFR con caminata (Abe et al., 2006); tampoco cambió en el presente estudio. Por lo tanto, un factor importante para el incremento de la fuerza muscular después del entrenamiento BFR es el aumento en el CSA del músculo, que supera la adaptación neural, tal como los patrones de reclutamiento de fibras.

Los resultados mostraron que el entrenamiento de ciclismo con BFR produjo un incremento del 6.4% ($p < 0.05$) en el $VO_{2\text{máx}}$ absoluto y un incremento del 15.4% ($p < 0.01$) en el tiempo de ejercicio hasta el agotamiento. La magnitud de cambio en el $VO_{2\text{máx}}$ (incremento del porcentaje en el $VO_{2\text{máx}}$ dividido por el total de sesiones de entrenamiento) en el grupo BFR (0.25%) es similar a la que se reportó en algunos estudios (0.25%-0.26%) (Gaesser y Rich, 1984; Wilmore et al., 1980), pero más baja que la que se reportó en otro estudio (0.60%) (McCarthy et al., 1995). Existen estudios (Gaesser y Rich, 1984; Wenger y Bell, 1986) que han demostrado que la magnitud del cambio en el $VO_{2\text{máx}}$ aumenta al incrementarse la intensidad de ejercicio del 50% al 100% del $VO_{2\text{máx}}$. El mínimo estímulo necesario para provocar cambios es ~50% del $VO_{2\text{máx}}$, aunque un estudio (Gaesser y Rich, 1984) reportó que el incremento en el $VO_{2\text{máx}}$ después del entrenamiento de pedaleo fue del 45% del $VO_{2\text{máx}}$. Si la intensidad del ejercicio es baja, los esfuerzos de duración más larga (>35 min) pueden ser más efectivos que los esfuerzos de duración más corta a intensidad más elevada (Wenger y Bell, 1986). Durante el ejercicio de baja intensidad con BFR, el volumen sistólico (SV) disminuyó y la HR aumentó sin cambios en el rendimiento cardíaco (Ozaki et al., 2010; Takano et al., 2005). En el presente estudio, la intensidad y la duración del ejercicio fueron del 40% del $VO_{2\text{máx}}$ y de 15 min, respectivamente, en el grupo BFR. No obstante, durante las sesiones de entrenamiento, la intensidad del ejercicio estimada a partir de la HRR máxima fue de 59% en promedio, lo cual está dentro de la intensidad efectiva de ejercicio para lograr mejoras en el $VO_{2\text{máx}}$.

Se sabe que el incremento en el $VO_{2\text{máx}}$ inducido por el entrenamiento se debe a las adaptaciones cardiovasculares centrales y/o metabólicas periféricas, y el $VO_{2\text{máx}}$ es el producto del gasto cardíaco y la diferencia arterio-venosa mixta ($a-vO_2$) a una carga de trabajo máxima. Sin embargo, hay pocos estudios que investiguen las respuestas hemodinámicas cardiovasculares y metabólicas musculares al entrenamiento con BFR (Ozaki et al., 2010). Aunque el método de BFR es diferente, Sundberg (1994) halló un incremento en el $VO_{2\text{máx}}$ por medio de la utilización del entrenamiento ciclismo a una sola pierna en posición supina con presión de cámara de 50 mmHg (flujo sanguíneo de la pierna reducido en un 16%) durante 4 semanas (4 sesiones/semana). En dicho estudio, se observó un incremento en la actividad enzimática del metabolismo oxidativo y en la densidad capilar de la pierna entrenada en isquemia, pero no se reportaron las adaptaciones cardiovasculares al entrenamiento isquémico. Recientemente, un estudio reportó que se observaron incrementos en el $VO_{2\text{máx}}$ y el SV del ejercicio sub-máximo después de 2 semanas de entrenamiento de caminata con BFR de dos veces por día, 6 días/semana, mientras que el SV en el descanso permaneció sin cambios (Park et al., 2010). Por lo tanto, el incremento en el $VO_{2\text{máx}}$ por medio del entrenamiento de BFR puede deberse a las adaptaciones en la capacidad oxidativa del músculo (diferencia $a-vO_2$) y el SV. Además, el incremento en la masa muscular del tren inferior puede estar asociado con las mejoras en el $VO_{2\text{máx}}$ en el grupo BFR.

Pocos estudios han intentado dilucidar los mecanismos de adaptación celular y molecular en el músculo esquelético así como también del sistema cardiorrespiratorio en respuesta al ejercicio con BFR de baja intensidad (Manini y Clark, 2009). Estudios previos han demostrado que una única serie al 20% de 1RM en el ejercicio de extensión de rodilla BFR incrementó tanto la síntesis proteica del músculo vasto externo como la activación de la vía de señalización Akt/mTOR en hombres jóvenes (Fujita et al., 2007) y adultos (Fry et al., 2010), aunque no se midió el índice de degradación de proteínas musculares. Estas respuestas anabólicas pueden contribuir de manera significativa a la hipertrofia muscular inducida por el entrenamiento con BFR. Sin embargo, no ha habido ningún estudio que evalúe los cambios en la densidad mitocondrial y capilar y las enzimas musculares que reflejan una producción de energía aeróbica, como tampoco la función cardíaca en respuesta al entrenamiento de ejercicios con BFR. Es necesario que se realicen más investigaciones para clarificar los mecanismos de mejoras simultáneas inducidas por el entrenamiento de BFR en ambos tipos de aptitud física.

CONCLUSION

En conclusión, el entrenamiento de pedaleo de baja intensidad (40% VO₂máx) y de corta duración (15 min), combinado con una restricción del flujo sanguíneo puede producir un incremento significativo en el volumen muscular del muslo y la capacidad aeróbica en hombres jóvenes.

Puntos Clave

- No se han reportado mejoras simultáneas en la capacidad aeróbica y la hipertrofia muscular en respuesta a una única modalidad de entrenamiento.
- En el presente estudio, el entrenamiento de pedaleo de baja intensidad (40% del VO₂máx) con BFR puede generar mejoras simultáneas en la hipertrofia muscular y la capacidad aeróbica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los estudiantes que participaron en este estudio. Asimismo, agradecen enormemente la asistencia del personal de la JAXA. Este estudio ha sido financiado en parte por la JAXA.

REFERENCIAS

1. Abe, T., DeHoyos, D.V., Pollock, M.L. and Garzarella, L. (2000). Time course for strength and muscle thickness changes following upper and lower body resistance training in men and women. *European Journal of Applied Physiology* 81, 174-180
2. Abe, T., Yasuda, T., Midorikawa, T., Sato, Y., Kearns, C.F., Inoue, K., Koizumi, K. and Ishii, N. (2005). Skeletal muscle size and circulating IGF-1 are increased after two weeks of twice daily [KAATSU] resistance training. *International Journal of KAATSU Training Research* 1, 6-12
3. Abe, T., Kearns, C.F. and Fukunaga, T. (2003). Sex differences in whole body skeletal muscle mass measured by magnetic resonance imaging and its distribution in young Japanese adults. *British Journal of Sports Medicine* 37, 436-440
4. Abe, T., Kearns, C.F. and Sato, Y. (2006). Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle, Kaatsu-walk training. *Journal of Applied Physiology* 100, 1460-1466
5. Abe, T., Sakamaki, M., Fujita, S., Ozaki, H., Sugaya, M., Sato, Y. and Nakajima, T. (2010). Effects of low-intensity walk training with restricted leg blood flow on muscle strength and aerobic capacity in elderly subjects. *Journal of Geriatric Physical Therapy* 33, 34-40
6. Bell, G.J., Syrotuik, D., Martin, T.P., Burnham, R. and Quinney, H.A. (2000). Effect of concurrent strength and endurance training on skeletal muscle properties and hormone concentrations in humans. *European Journal of Applied Physiology* 81, 418-427
7. Coffey, V.G. and Hawley, J.A. (2007). The molecular bases of training adaptation. *Sports Medicine* 37, 737-763
8. Denis, C., Chatard, J.C., Dormois, D., Linossier, M.T., Geysant, A. and Lacour, J.R. (1986). Effects of endurance training on capillary supply of human skeletal muscle on two age groups (20 and 60 years). *Journal of Physiology (Paris)* 81, 379-383
9. Fujita, S., Abe, T., Drummond, M.J., Cadenas, J.G., Dreyer, H.C., Sato, Y., Volpi, E. and Rasmussen, B.B. (2007). Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis. *Journal of Applied Physiology* 103, 903-910
10. Fry, C.S., Glynn, E.L., Drummond, M.J., Timmerman, K., Fujita, S., Abe, T., Dhanani, S., Volpi, E. and Rasmussen, B.B. (2010). Blood flow restriction exercise stimulates mTORC1 signaling and muscle protein synthesis in older men. *Journal of Applied Physiology* 108, 1199-1209
11. Gaesser, G.A. and Rich, R.G. (1984). Effects of high- and low-intensity exercise training on aerobic capacity and blood lipids. *Medicine and Science in Sports Exercise* 16, 269-274
12. Gollnick, P.D., Armstrong, R.B., Saltin, B., Saubert, C.W. 4th, Sem-browich, W.L. and Shepherd, R.E. (1973). Effect of training on enzyme activity and fiber composition of human skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology* 34, 107-111
13. Harber, M.P., Konopka, A.R., Douglass, M.D., Minchev, K., Kaminsky, L.A., Trappe, T.A. and Trappe, S. (2009). Aerobic exercise training improves whole muscle and single myofiber size and function in older women. *American Journal of Physiology* 297, R1452-R1459
14. Hass, C., Garzarella, L., de Hoyos, D.V., Connaughton, D.P. and Pollock, M.L. (2001). Concurrent improvements in cardiorespiratory and muscle fitness in response to total body recumbent stepping in humans. *European Journal of Applied Physiology* 85, 157-163
15. Hoppeler, H. (1986). Exercise-induced ultrastructural changes in skeletal muscle. *International Journal of Sports Medicine* 7,

16. Hurley, B.F., Seals, D.R., Ehsani, A.A., Cartier, L.J., Dalsky, G.P., Hagberg, J.M. and Holloszy, J.O (1984). Effect of high-intensity strength training on cardiovascular function. *Medicine and Science in Sports Exercise* 16, 483-488
17. Jones, D.A. and Rutherford, O.M (1987). Human muscle strength training; the effects of three different regimens and the nature of the resultant changes. *Journal of Physiology* 391, 1-11
18. Kraemer, W.J., Patton, J.F., Gordon, S.E., Harman, E.A., Deschenes, M.R., Reynolds, K., Newton, R.U., Triplett, N.T. and Dziados, J.E (1995). Compatibility of high-intensity strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations. *Journal of Applied Physiology* 78, 976-989
19. Luthi, J.M., Howald, H., Claassen, H., Rosler, K., Vock, P. and Hop-peler, H (1986). Structural changes in skeletal muscle tissue with heavy-resistance exercise. *International Journal of Sports Medicine* 7, 123-127
20. MacDougall, J.D., Sale, D.G., Moroz, J.R., Eleder, G.C.B., Sutton, J.R. and Howald, H (1979). Mitochondrial volume density in human skeletal muscle following heavy resistance training. *Medicine and Science in Sports* 11, 164-166
21. Manini, T.M. and Clark, B.C (2009). Blood flow restricted exercise and skeletal muscle health. *Exercise and Sports Science Review* 37, 78-85
22. McCarthy, J.P., Agre, J.C., Graf, B.K., Pozniak, M.A. and Vailas, A.C (1995). Compatibility of adaptive responses with combining strength and endurance training. *Medicine and Science in Sports Exercise* 27, 429-436
23. Nelson, R.R., Gobel, F.L., Jorgensen, C.R., Wang, K., Wang, Y. and Taylor, H.L (1974). Hemodynamic predictors of myocardial oxygen consumption during static and dynamic exercise. *Circulation* 50, 1179-1189
24. Nygren, A.T., Sundberg, C.J., Goransson, H., Esbjornsson-Liljedahl, M., Jansson, E. and Kaijser, L (2000). Effects of dynamic ischaemic training on human skeletal muscle dimensions. *European Journal of Applied Physiology* 82, 137-141
25. Ozaki, H., Brechue, W.F., Sakamaki, M., Yasuda, T., Nishikawa, M., Aoki, N., Ogita, F. and Abe, T (2010). Metabolic and cardiovascular responses to upright cycle exercise with leg blood flow reduction. *Journal of Sports Science and Medicine* 9, 224-230.
26. Park, S., Kim, J.K., Choi, H.M., Kim, H.G., Beekley, M.D. and Nho, H (2010). Increase in maximal oxygen uptake following 2-week walk training with blood flow occlusion in athletes. *European Journal of Applied Physiology* 109, 591-600
27. Schwartz, R.S., Shuman, W.P., Larson, V., Cain, K.C. and Fellingham, G.W., Beard, J.C., Kahn, S.E., Stratton, J.R., Cerqueira, M.D., Abrass, I.B (1991). The effect of intensive endurance exercise training on body fat distribution in young and older men. *Metabolism* 40, 545-551
28. Seynnes, O.R., de Boer, M. and Narici, M.V (2007). Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training. *Journal of Applied Physiology* 102, 368-373
29. Sundberg, C.J (1994). Exercise and training during graded leg ischaemia in healthy man. *Acta Physiologica Scandinavica* 615 (Suppl.), 1-50
30. Tabata, I., Atomi, Y., Kanehisa, H. and Miyashita, M (1990). Effect of high-intensity endurance training on isokinetic muscle power. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 60, 254-258
31. Takano, H., Morita, T., Iida, H., Asada, K., Kato, M., Uno, K., Hirose, K., Matsumoto, A., Takenaka, K., Hirata, Y., Eto, F., Nagai, R., Sato, Y. and Nakajima, T (2005). Hemodynamic and hormonal responses to a short-term low-intensity resistance exercise with the reduction of muscle blood flow. *European Journal of Applied Physiology* 95, 65-73
32. Takarada, Y., Sato, Y. and Ishii, N (2002). Effects of resistance exercise combined with vascular occlusion on muscle function in BFR training on muscle and VO₂max athletes. *European Journal of Applied Physiology* 86, 308-314
33. Tesch, P.A., Komi, P.V. and Hakkinen, K (1987). Enzymatic adaptations consequent to long-term strength training. *International Journal of Sports Medicine* 8(Suppl. 1), 66-69
34. Tesch, P.A., Ekberg, A., Lindquist, D.M. and Trieschmann, J.T (2004). Muscle hypertrophy following 5-week resistance training using a non-gravity-dependent exercise system. *Acta Physiologica Scandinavica* 180, 89-98
35. Wenger, H.A. and Bell, G.J (1986). The interactions of intensity, frequency and duration of exercise training in altering cardiorespiratory fitness. *Sports Medicine* 3, 346-356
36. Wilkinson, S.B., Tarnopolsky, M.A., Grant, E.J., Correia, C.E., Phillips, S.M (2006). Hypertrophy with unilateral resistance exercise occurs without increases in endogenous anabolic hormone concentration. *European Journal of Applied Physiology* 98, 546-555
37. Yasuda, T., Brechue, W.F., Fujita, T., Sato, Y. and Abe, T (2008). Muscle activation during low-intensity muscle contractions with varying levels of external compression. *Journal of Sports Science and Medicine* 7, 467-474

Cita Original

Takashi Abe, Satoshi Fujita, Toshiaki Nakajima, Mikako Sakamaki, Hayao Ozaki, Riki Ogasawara, Masato Sugaya, Maiko Kudo, Miwa Kurano, Tomohiro Yasuda, Yoshiaki Sato, Hiroshi Ohshima, Chiaki Mukai and Naokata Ishii. Effects of Low-Intensity Cycle Training with Restricted Leg Blood Flow on Thigh Muscle Volume and VO₂max in Young Men. *Journal of Sports Science and Medicine* (2010) 9, 452 - 458