

Article

Los Intervalos Cortos Inducen Adaptaciones al Entrenamiento Superiores a las de los Intervalos Largos en Ciclistas: Metodología con Esfuerzos Equiparables

B. R. Ronnestad¹, J. Hansen¹, G. Vegge¹, E. Tonnessen² y G. Slettalokken¹

¹Section for Sport Science, Lillehammer University College, Lillehammer, Norway

²Norwegiati Olympic and Paralympic Committee and Confederation of Sports, Oslo, Norway

RESUMEN

El propósito de este estudio fue comparar los efectos de 10 semanas de entrenamiento con intervalos cortos (SI; n= 9) o intervalos largos (LI; n=1) con esfuerzos similares en ciclistas. Las sesiones de entrenamiento intervalado de alta intensidad (HIT) fueron realizadas dos veces por semana y fueron intercaladas con entrenamiento de baja intensidad. No se observó ninguna diferencia entre los grupos al inicio del estudio (Pre). No se observó ninguna diferencia entre los grupos en el volumen total entre los dos entrenamientos HIT y el entrenamiento de baja intensidad. El grupo SI logró una mayor mejora relativa en VO₂max que el grupo LI (8,7%±5,0% contra 2,6%±5,2%), respectivamente, $P \leq 0,05$). El tamaño de efecto medio (ES) de la mejora relativa en todos los parámetros medidos, entre los que se incluían el rendimiento medido como producción de potencia media durante los test máximo de 30 segundos, 5 minutos y 40 minutos reveló un efecto moderado a grande del entrenamiento SI versus el entrenamiento LI (el rango de ES fue 0,86-1,54). Estos resultados sugieren que el presente protocolo de SI induce adaptaciones al entrenamiento superiores a las del protocolo LI en la región de elevada potencia y en la región de menor potencia del perfil de potencia de ciclistas.

Palabras Clave: Ejercicios de ciclismo de alta intensidad, prescripción de entrenamiento intervalado, entrenamiento de resistencia, rendimiento de ciclismo, perfil de potencia

INTRODUCCION

Para que los atletas de resistencia alcancen el estímulo de entrenamiento óptimo, se recomienda que realicen cierta cantidad de entrenamiento en intensidades de 90-100% del consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}; Wenger y Bell 1986; Laursen y Jenkins 2002). Sin embargo, el trabajo continuo en tales intensidades elevadas no puede mantenerse durante períodos prolongados de tiempo, lo que limita el tiempo total de entrenamiento en estas intensidades dentro de una sesión de entrenamiento. Utilizando diferentes modelos de programas de entrenamiento intervalado es posible aumentar el tiempo total de trabajo acumulado en esta elevada intensidad durante una sola sesión (MacDougall y Sale, 1981). Durante

mucho tiempo, se ha reconocido que el entrenamiento de alta intensidad (HIT) puede mejorar el rendimiento de resistencia (por ejemplo, Shephard, 1968; Fox et al., 1973). El HIT puede ser dividido en intervalos de trabajo largos de ~3-5 min a una intensidad de ejercicio relativamente alta (LI) o en intervalos de trabajo más cortos (SI) de aprox. 15-45 s a una intensidad de ejercicio aun más alta que la utilizada durante los intervalos más largos (Tschakert y Hofmann, 2013). Se han utilizado diferentes relaciones trabajo:recuperación y las más frecuentemente utilizadas han sido las relaciones 2:1 y 1:1 (revisadas en Midgley y McNaughton, 2006; Rozenek et al., 2007).

Tanto el entrenamiento SI (Tabata et al. 1996; Iaia et al., 2008; Gunnarsson y Bangsbo, 2012) como el entrenamiento LI (Lindsay et al., 1996; Westgarth-Taylor et al., 1997; Rønnestad et al., 2012) han producido mejoras en el rendimiento de resistencia o en los parámetros relacionados al rendimiento en los participantes entrenados en resistencia. Además, los pocos estudios que investigaron los efectos del entrenamiento SI y LI en los participantes entrenados en resistencia informaron mejoras similares con los dos protocolos de HIT (Stepto et al., 1999; Laursen et al., 2005; Helgerud et al., 2007). Sin embargo, problemas metodológicos como un tamaño de muestra pequeño, un período de intervención corto, y/o la equiparación de los regímenes de entrenamiento en cuanto al gasto de energía total han dificultado la comparación de los resultados. Se ha sugerido que la equiparación de los regímenes de entrenamiento en función del consumo de energía induce artificialmente diferentes esfuerzos totales entre diferentes regímenes de intervalos (Seiler et al., 2013). Según nuestros conocimientos los efectos sobre el rendimiento de SI y LI con esfuerzos similares en los ciclistas debe ser investigado. Se ha sugerido que los tiempos de entrenamiento $> 90\% \text{VO}_{2\text{max}}$ podrían ser un buen criterio para juzgar la efectividad del estímulo para mejorar la aptitud aeróbica (Thevenet et al., 2007). En un estudio reciente, observamos que una sesión de SI que alternaba entre intervalos de trabajo de 30 s y 15 s de recuperación hasta el agotamiento indujo un mayor tiempo total por encima de $90\% \text{VO}_{2\text{max}}$ que una sesión de LT con intervalos de trabajo de aprox. 4,5 min, separados por períodos de recuperación con una duración igual al 50% del período de trabajo hasta el agotamiento (Rønnestad y Hansen, 2013). Sin embargo, la intensidad en ambas sesiones fue la potencia mínima que produce teóricamente el $\text{VO}_{2\text{max}}$ ($\text{PVO}_{2\text{max}}$) y podría no reflejar la práctica del mundo real. Además, es difícil saber si se producirán diferencias en las adaptaciones al entrenamiento a largo plazo entre el protocolo SI y el protocolo LI.

Por consiguiente, el objetivo principal de este estudio fue investigar las adaptaciones al entrenamiento de 10 semanas de entrenamiento SI o LI con esfuerzos similares en ciclistas. Para tener un panorama de los efectos de estos dos regímenes de entrenamiento tanto en la parte de alta potencia como en la parte de baja potencia del perfil de potencia de los ciclistas, se investigó tanto el rendimiento de corta duración como el de larga duración y también se analizaron los indicadores clásicos de rendimiento de resistencia. Planteamos la hipótesis que el entrenamiento SI proporcionaría efectos superiores tanto en la parte de alta potencia como en la parte de baja potencia del perfil de potencia de los ciclistas.

MÉTODOS

Sujetos

Veinte ciclistas competitivos de sexo masculino participaron voluntariamente en el estudio. Sobre la base de la producción de potencia máxima, la relación potencia-peso y la cantidad promedio de horas de entrenamiento por semana, los ciclistas fueron considerados como bien entrenados (Jeukendrup et al. 2000). Los ciclistas (edad = 33 ± 10 años, talla = 182 ± 4 centímetros, masa corporal = 76 ± 6 kg) fueron asignados al azar al grupo SI o al grupo LI. La aleatorización se estratificó por medio del $\text{VO}_{2\text{max}}$. Dos ciclistas del grupo LI no finalizaron el estudio debido a enfermedad y un ciclista de cada uno de los grupos se retiró del estudio sin dar una explicación, lo que arrojó un número de nueve ciclistas en el grupo SI y siete ciclistas en el grupo LI. Durante las 4 semanas previas al período de intervención, los ciclistas registraron su entrenamiento en un diario de entrenamiento. En este período, los ciclistas eran libres de realizar el tipo de entrenamiento que desearan. No se observó ninguna diferencia significativa entre el grupo SI y el grupo LI en las horas de entrenamiento por semana durante el período de 4 semanas previo a las evaluaciones iniciales (8 ± 5 y 10 ± 5 h, respectivamente, $P=0,6$). La mayor parte de este entrenamiento consistió en entrenamiento de resistencia de baja intensidad, pero $0,3 \pm 0,2$ y $0,4 \pm 0,3$ horas por semana, respectivamente, fue entrenamiento HIT. El estudio se realizó siguiendo las normas éticas establecidas por la Declaración de Helsinki de 1975 y fue aceptado por el comité ético local del Colegio Universitario de Lillehammer. Todos los ciclistas firmaron un formulario de consentimiento informado antes de participar en el estudio.

Intervención de entrenamiento

No se observaron diferencias entre los grupos en la duración total del entrenamiento o en la intensidad del entrenamiento en las diferentes zonas de entrenamiento (Tabla 1). El entrenamiento de resistencia fue dividido en tres zonas de frecuencia cardíaca (HR): (a) 60-82%, (b) 83-87%, y (c) 88-100% de HR máxima y fue registrado en un diario de entrenamiento. El grupo SI realizó intervalos de trabajo de 30 s separados por períodos de recuperación de 15-s

continuamente durante 9,5 min seguidos por un período de recuperación de 3 min. En el grupo SI, este período de 9,5-min se realizó tres veces en una sesión de intervalos. El grupo LI realizó 4 intervalos de trabajo de 5 min separados por períodos de recuperación de 2,5-min. Así, el tiempo total de los intervalos de trabajo en una sesión de intervalos para SI y LI fue 19,5 y 20,0 min, respectivamente, mientras que el período de recuperación total fue 9,0 y 7,5 min, respectivamente (Tabla 2). En ambos grupos, la producción de potencia durante los períodos de recuperación fue 50% de la producción de potencia utilizada durante los intervalos de trabajo. El índice de esfuerzo percibido (RPE) se registró después de cada serie de intervalos mediante la escala de Borg que contempla valores de 6 a 20 (Borg, 1982), y el RPE de la sesión (Foster, 1998) se obtuvo 30 min después de cada sesión de intervalos. Se analizaron muestras de sangre venosa extraídas de la yema de los dedos para determinar la concentración de lactato ([La-]) después de cada serie de intervalos durante la primera semana de entrenamiento, y después de esto por lo menos cada tres semanas. Todas las mediciones de [La-] obtenidas durante el entrenamiento y durante las pruebas en el estudio presente se realizaron con el mismo instrumento portátil (*Lactate Pro LT-1710, Arkray, Inc., Kyoto, Japón*). Todas las sesiones durante la primera semana de entrenamiento y por lo menos una sesión cada tres semanas fue supervisada en los grupos y los investigadores dieron un fuerte estímulo a los atletas. Los dos grupos debían realizar los intervalos en la intensidad de trabajo máxima sostenible, porque se buscaba alcanzar la mayor producción de potencia promedio durante cada sesión con intervalos. Esto hace que la producción de potencia media real de cada sesión de intervalos sea un indicador del nivel de rendimiento. Se constató esfuerzo similar durante los entrenamientos SI y LI y no se observaron diferencias entre los grupos en la [La-], el RPE ni en el RPE de la sesión durante las sesiones de entrenamiento intervalado (Tabla 2). A pesar de la evidencia de esfuerzos similares entre los grupos, se observó una pequeña y menor respuesta no significativa desde el punto de vista estadístico, en el grupo de LI entre las semanas 3-4 y 5-6 (Figura 1). Es necesario destacar que cuando la duración de los intervalos de trabajo difiere tanto, como ocurrió en la investigación presente, y el tiempo de trabajo total es similar, se producirán diferencias entre los grupos en la producción de potencia y por lo tanto en el gasto de energía total durante las sesiones de HIT, a pesar del esfuerzo similar en los dos grupos. Dicho esto, el esfuerzo similar se asemeja a la manera en que los atletas realizan su entrenamiento típicamente (Seiler et al., 2013).

Zona de intensidad	SI (N=9)	LI (N=7)
Zona de intensidad I (60-82% de HR _{max})	7,8±5,9	9,7±3,5
Zona de intensidad II (83-87% de HR _{max})	0,6±0,2	0,7±0,4
Zona de intensidad III (88-100% de HR _{max})	0,7±0,3	0,6±0,3

Tabla 1. Duración (en horas por semana) del entrenamiento de resistencia realizado durante el período de intervención de 10-semana en el grupo que realizó los intervalos cortos (SI) y el grupo que realizó los intervalos largos (LI). Los valores se presentan en forma de Media±Desviación estándar; HR = Frecuencia cardíaca máxima.

	SI (n=9)	LI (n=7)
Duración de los intervalos de trabajo (s)	30	300
Duración del descanso por serie (s)	15	0
Cantidad de intervalos de trabajo por serie	13	1
Período de trabajo total por serie (s)	13 x 30 s = 390	1 x 300s = 300
Período de descanso total por serie (s)	12x15 s = 180	0
Cantidad de series	3	4
Tiempo entre las series (s)	180	150
Período total de trabajo por sesión (s)	3x390 = 1170	4x300 = 1200
Período total de recuperación por sesión (s)	(3 x 180 s) + (2 x 180 s) = 900	3x150=450
Intensidad durante las fases descanso/recuperación	50% de la de los intervalos de trabajo	50% de la de los intervalos de trabajo
Duración total de la sesión (sin contar la entrada en calor/vuelta a la calma) (s)	1170+900 = 2070	1200+450 = 1650
Producción de potencia durante los intervalos de trabajo (W)	363±32#	324±42
[La ⁻] durante todas las series de trabajo (mmol/L)	10,6±2,5	10,0±3,5
[La ⁻] después del último intervalo de trabajo (mmol/L)	11,4±2,4	10,5±3,7
RPE en todas las series de trabajo	17,8±0,5	17,6±0,8
RPE en la última serie de trabajo	18,5±0,4	18,2 ±0,4
RPE de la sesión	7,8±0,5	7,5±1,1

Tabla 2. Características de los protocolos de entrenamiento con intervalos cortos (SI) e intervalos largos (LI) utilizados durante la intervención. #Mayor que LI ($P < 0,05$). Los valores se presentan en forma de media \pm desviación estándar; RPE= Índice de esfuerzo percibido

Cada sesión de intervalos se inició con una entrada en calor individual de 15-20-min y finalizó con dos a tres esprints sub máximos de 20-30 seg. Se fijó este requerimiento de optimización individual de la entrada en calor debido a las diferentes preferencias de los ciclistas. Los entrenamientos SI y LI se realizaron en las propias bicicletas de los ciclistas equipadas con un potenciómetro (*PowerTap SL 2.4, CyclcOps, Madison, WI, EE.UU.*) adosado a la rueda trasera y conectado a un rodillo, o en una bicicleta ergométrica avanzada (*Lode Excalibur Sport, Lode B.V., Groningen, Países Bajos*). Cuatro ciclistas del grupo SI realizaron todo el entrenamiento en sus propias bicicletas, y para asegurar que el aumento y la disminución en la producción de potencia durante las sesiones de SI fueran rápidos, las bicicletas se colocaron en un rodillo con freno electromagnético (*CompuTrainer Lab™ T RaaerMale, Inc., Seattle, WA, EE.UU.*). Los 5 ciclistas restantes del grupo SI realizaron sus sesiones de HIT en la bicicleta ergométrica *Lode*. Los otros entrenamientos fueron realizados en sus propias bicicletas. En teoría el entrenamiento en la bicicleta ergométrica podría permitir un mayor aumento en las mediciones post entrenamiento (Post) debido a la mayor familiarización. Sin embargo, todos los ciclistas que participaron en este estudio tenían experiencia previa con la bicicleta ergométrica antes de comenzar la intervención, y la bicicleta ergométrica es sumamente precisa en sus posibilidades de ajuste de sillín, posición del manubrio, longitud de brazo de la biela; además en la computadora de la bicicleta se fijó la posición de asiento exacta de cada ciclista con el fin de asegurar una posición del asiento similar y óptima para cada ciclista de manera individual. Todos estos factores, y el hecho que el ciclismo es un movimiento fácil, más bien de coordinación y que los ciclistas estaban bien entrenados, contribuyeron a minimizar cualquier ventaja potencial de la familiarización de realizar las sesiones de HIT en este tipo de bicicleta. Destacamos esto por hallazgo de mejoras similares en el rendimiento de test máximos de 40-min entre el subgrupo que realizó las sesiones de HIT en la bicicleta ergométrica y el que lo realizó en la propia bicicleta (mejoras de 11% y 13%, respectivamente). Las sesiones de SI individuales fueron programadas en el software del rodillo y de la bicicleta ergométrica. La producción de potencia durante los primeros intervalos de trabajo cortos se fijó en PVO_{2max} . Un estudio previo de nuestro laboratorio reveló que PVO_{2max} es una intensidad adecuada para los intervalos de trabajo utilizados en el grupo SI (Rønnestad y Hansen, 2013). La producción de potencia durante los intervalos de trabajo subsiguientes durante el periodo de intervención se ajustó individualmente entre cada serie de intervalo para asegurar la producción de potencia óptima individual (i.e. la mayor producción de potencia media posible durante cada sesión). La intervención se completó durante la fase de preparación inicial de los ciclistas.

Procedimientos de evaluación

Las pruebas físicas se realizaron antes y después del período de intervención de 10 semanas. Se solicitó a los ciclistas que se abstuvieran de realizar todo tipo de ejercicio de alta intensidad el día anterior a cada uno de los tres días de evaluación. También se les solicitó que consumieran el mismo tipo de alimentos antes de cada prueba y no podían comer durante la hora previa a una prueba ni consumir café u otros productos que contuvieran cafeína durante las 3 h previas a las pruebas. Todas las pruebas se realizaron bajo condiciones medioambientales similares (18-21 °C), y se utilizó un ventilador para asegurar que el aire circulara alrededor del ciclista. Se les proporcionó un estímulo verbal fuerte durante todas las pruebas para asegurar el esfuerzo máximo. Todas las pruebas para los ciclistas individuales se realizaron en el mismo momento día (± 1 h) para evitar cualquier influencia del ritmo circadiano. Todas las evaluaciones se realizaron en la misma bicicleta ergométrica con freno electromagnético (*Lode Exealibur Sport, Lode B.V.*) que fue ajustada según la preferencia de cada ciclista en cuanto a la altura del sillín, distancia horizontal entre la punta del sillín, el pedalier y la posición del manubrio. En todas las pruebas se utilizaron las mismas posiciones del sillín.

Prueba del perfil del lactato sanguíneo, VO_{2max} y PVO_{2max}

El primer día de evaluación se realizó la determinación del perfil de lactato sanguíneo y un test de VO_{2max} . El perfil de lactato sanguíneo ha sido descrito en otras publicaciones (Rønnestad et al., 2010). Brevemente, el test comenzó sin entrada en calor, con 5 min de pedaleo a 125 W. Luego de esto, los ciclistas siguieron pedaleando y la producción de potencia se incrementó 50 W cada 5 min. Se tomaron muestras de sangre de la yema de los dedos al finalizar cada serie de 5 min y en las mismas se analizó la concentración de lactato ([La-]) en la sangre completa. El test finalizó cuando se constataba una [La-] de 4 mmol/L o superior. El VO_2 , la tasa de intercambio respiratorio (RER) y la frecuencia cardíaca (HR) se midieron durante los últimos 3 min de cada serie. La HR se determinó con un monitor de frecuencia cardíaca *Polar S610i* (*Polar, Kempele, Finlandia*). El VO_2 se determinó (tiempo de muestreo de 30 segundos) con un sistema metabólico informatizado con cámara de mezclado (*Oxycon Pro, Erich Jaeger, Hoechberg, Alemania*). EL analizador de gases se calibró con gases de calibración certificados y de concentraciones conocidas antes de cada prueba. La turbina de flujo (*Triple V, Erich Jaeger*) se calibró antes de cada test con una jeringa de calibración de 3 L, serie 5530, (*Hans Rudolph, Kansas City, MO, EE.UU.*). En los tests subsiguientes se utilizó el mismo sistema metabólico con las mismas rutinas de calibración. A partir de esta prueba de ciclismo incremental continua, se calculó la producción de potencia en el umbral del lactato como la producción de potencia que correspondía a 4 mmol/L. La economía de ciclismo se calculó como el consumo de oxígeno promedio entre los 3,0 y 4,5 min de las primeras tres etapas submáximas de 5 min del test de perfil de lactato sanguíneo (125, 175 y 225 W). La eficiencia bruta se calculó siguiendo el mismo método de Coyle et al. (1992). Brevemente, la tasa de gasto energético se calculó utilizando los valores brutos de VO_2 y sus correspondientes valores de RER; la eficiencia bruta se expresó como la relación entre el trabajo alcanzado por minuto y el gasto calórico por minuto.

Después de finalizar el test de perfil de lactato sanguíneo, los ciclistas realizaron 15 min de pedaleo de recuperación antes de realizar el otro test de ciclismo incremental para determinar el VO_{2max} . Este test ha sido descrito en otras publicaciones (Rønnestad et al., 2011). Brevemente, la prueba comenzó con 1 minuto de pedaleo a una producción de potencia que correspondía a 3 W/kg (redondeando hacia abajo hasta un valor más cercano a 50 W). Posteriormente la producción de potencia se incrementó 25 W todos los minutos hasta el agotamiento. El VO_{2max} se calculó obteniendo el promedio de los dos valores más altos de VO_2 en 30 seg. determinados. Una $HR \geq 95\%$ de la HR máxima reportada en los sujetos, un $ER \geq 1,05$ y una $[La-] \geq 8,0$ mmol/L se consideraron criterios necesarios para evaluar si se obtenía el VO_{2max} . La producción de potencia aeróbica máxima (W_{max}) se calculó como la producción de potencia media durante los últimos 2 min de la prueba incremental de VO_{2max} . El PVO_{2max} se calculó siguiendo la metodología de Daniels et al. (1984). Este método calcula PVO_{2max} por extrapolación del VO_2 individual en relación a la producción de potencia en el VO_{2max} y ha sido previamente utilizado para determinar PVO_{2max} en ciclistas bien entrenados (Rønnestad. 2013).

Test de Wingate y test máximo de 5 min.

Tanto el test de Wingate como el test máximo de 5 min fueron realizados en una bicicleta ergométrica el segundo día de evaluación. La resistencia de frenado se fijó en 0,8 Nm/kg de masa corporal. Después de una entrada en calor de 20-min (que incluyó dos o tres esprints submáximos y 1 minuto de descanso), los ciclistas comenzaron a pedalear a 60 rpm sin resistencia de frenado. Luego, después de un conteo de 3 segundos se aplicó la resistencia de frenado al disco y se mantuvo constante a lo largo del test máximo de 30 s. La producción de potencia media se identificó como la producción de potencia promedio que se mantuvo a lo largo de los 30 s. Los ciclistas permanecieron sentados y fueron alentados verbalmente durante la prueba. Se solicitó a los ciclistas que pedalearan tan rápido como pudieran desde el inicio y no conservaran energía para la última parte de la prueba. Luego realizaron una recuperación pedaleando a aprox. 100W durante 15 min antes de realizar el test máximo de 5 min. Se solicitó que pedalearan con la mayor producción de potencia que pudieran durante el test de 5 minutos y que permanecieran sentados durante todo el test. Los ciclistas podían ajustar la producción de potencia a lo largo del test mediante una unidad de control externa colocada en el manubrio. Se midió el rendimiento durante el test máximo de 5 min como la producción de potencia promedio. Se ha demostrado que estas

pruebas con finales cerrados tienen un bajo coeficiente de variación en los ciclistas entrenados (CV <3,5%; Foss y Hallen, 2005).

Test máximo de 40 minutos

El test máximo de 40-min se realizó el tercer día de evaluación y comenzó luego de una entrada en calor individual de 15-min que finalizó con dos a tres esprints sub máximos. Se aplicó este criterio de optimización individual de entrada en calor debido a las diferentes preferencias entre los ciclistas. Durante la prueba máxima de 40 minutos se les solicitó que pedalearan con la mayor producción de potencia media que pudieran. El rendimiento se midió como la producción de potencia media durante la prueba. Los ciclistas podían ajustar la producción de potencia a lo largo de la prueba utilizando una unidad de control externo colocada en el manubrio. Los ciclistas no recibieron ninguna retroalimentación sobre la HR o la cadencia, pero si recibieron información sobre el tiempo restante y la producción de potencia instantánea. Los ciclistas podían pararse en los pedales ocasionalmente durante la prueba y podían beber agua sin restricciones. Luego del test, se midió la [La-] cada 5 minutos y se compararon los valores medios de los primeros y los últimos 20 min entre los grupos. Lamentablemente, debido a problemas técnicos no se pudo determinar la |La-| cada 5 min en las determinaciones iniciales (Pre).

Análisis estadísticos

Todos los valores que se presentan en el texto, las figuras y las tablas se expresan en forma de Media \pm SD. Para determinar las diferencias entre los grupos al inicio y en el volumen de entrenamiento se utilizó el test *t de Student* de muestras desapareadas. Debido al pequeño tamaño de la muestra y a que se esperaban cambios pequeños en estos ciclistas bien entrenados, los datos se analizaron mediante *Test t* y el tamaño de efecto medio (ES). El ES se calculó con el test "*d de Cohen*" para comparar la significancia práctica de las mejoras en el rendimiento entre los dos grupos. El criterio para interpretar la magnitud de ES fue 0,0-0,2 trivial, 0,2-0,6 pequeño, 0,6-1,2 moderado, 1,2-2,0 grande, y > 2,0 muy grande (Hopkins et al., 2009). Las diferencias Pre vs Post intervención entre los grupos fueron comparadas mediante *Test t de Student* de muestras apareadas (VO_{2max} , Wmax, producción de potencia durante los test de 30 s, 5 min y 40-min y en la [La-] de 4mmol/L). Para evaluar cualquier diferencia en los cambios relativos entre los grupos, se aplicó el test *t de Student* de muestras desapareadas. En cada grupo, la producción de potencia media durante los intervalos de trabajo para cada período de 2 semanas se comparó usando un análisis de la varianza de mediciones repetidas de una vía (ANOVA). En los casos en que el ANOVA fuera significativo, se aplicó el test *post hoc* de Tukey. Para analizar las diferencias entre los grupos en los cambios en la producción de potencia media durante cada periodo de 2 semanas, se aplicó un ANOVA de dos vías (tiempo y grupo como factores) y el test *post hoc* de Bonferroni. Los test *t* fueron realizados en Excel 2010 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, EE.UU.). Los ANOVA fueron realizados en GraphPad (GraphPad Software, Inc., San Diego, CA, EE.UU.). Todos los análisis con $P \leq 0,05$ fueron considerados estadísticamente significativos. Los P-valores entre 0,06 y 0,10 fueron considerados como tendencias.

RESULTADOS

Determinaciones realizadas al inicio del estudio (línea de base)

No se observaron diferencias entre los grupos en los valores obtenidos al inicio del estudio para la masa corporal, VO_{2max} , Wmax, eficiencia bruta, producción de potencia a 4 mmol/L y test máximo de 40-min.

Producción de potencia media en las sesiones de intervalos

Durante el período de entrenamiento, la potencia media de las sesiones de intervalos de trabajo aumentó $9\% \pm 5\%$ en el grupo SI ($P < 0,01$; Figura 1), mientras que en el grupo LI no se observó ningún cambio significativo ($2\% \pm 5\%$, $P = 0,2$). En la segunda mitad del período de entrenamiento, el aumento relativo en la producción de potencia media durante los intervalos de trabajo fue mayor en el grupo SI que en el grupo LI ($P < 0,05$; Figura 1). No se observaron diferencias entre los grupos SI y LI en RPE después de las sesiones de HIT durante las semanas de entrenamiento 1-2 ($17,4 \pm 1,3$ versus $17,1 \pm 1,4$, respectivamente), las semanas de entrenamiento 3-4 ($17,6 \pm 0,9$ versus $17,6 \pm 1,0$, respectivamente), semanas de entrenamiento 5-6 ($17,9 \pm 0,9$ versus $17,6 \pm 1,1$, respectivamente), semanas de entrenamiento 7-8 ($18,2 \pm 0,8$ versus $17,9 \pm 0,7$, respectivamente), ni en las semanas de entrenamiento 9-10 ($17,7 \pm 0,9$ versus $17,8 \pm 0,7$, respectivamente).

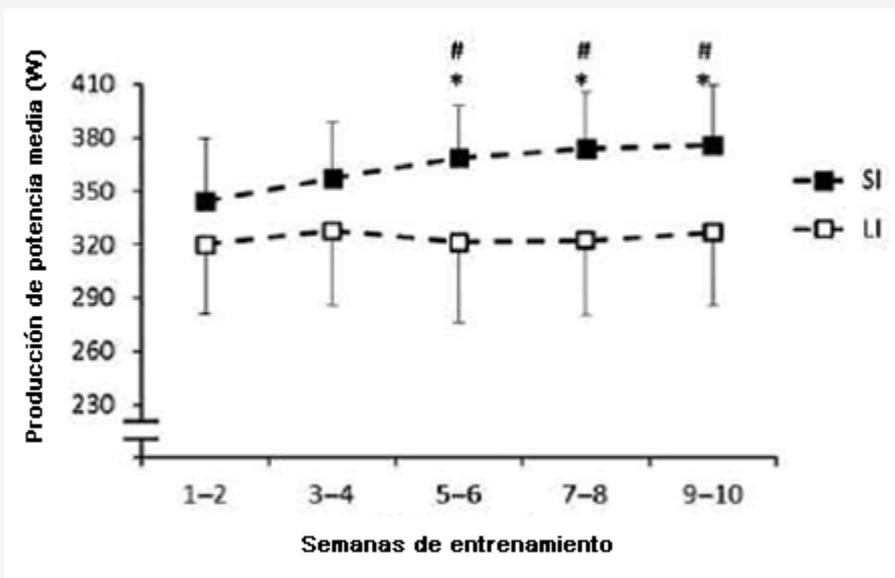


Figura 1. Producción de potencia media durante las sesiones de entrenamiento con intervalos cortos (SI) y largos (LI) durante el período de intervención de 10 semanas. *Mayor que durante las semanas 1-2 ($P < 0,05$); # Mayor incremento relativo que en el grupo LI ($P < 0,05$).

Masa corporal, VO_{2max} y W_{max}

La masa corporal no cambió significativamente durante la intervención en el grupo SI ($76,2 \pm 5,3$ kg versus $77,1 \pm 5,1$) ni en el grupo LI ($77,0 \pm 7,2$ versus $76,9 \pm 7,2$). El entrenamiento SI aumentó el VO_{2max} un $8,7\% \pm 5,0\%$ ($P < 0,05$), pero no se observó un aumento significativo después del entrenamiento en el grupo LI ($2,6\% \pm 5,2\%$, $P = 0,28$; Figura 2). El W_{max} aumentó $8,5\% \pm 5,2\%$ en el grupo SI ($P < 0,05$) pero no cambió significativamente en el grupo LI ($1,6\% \pm 3,6\%$, $P = 0,33$; Figura 3). El aumento porcentual en VO_{2max} y W_{max} fue mayor en el grupo SI que en el grupo LI ($P < 0,05$), y el ES medio del aumento relativo en W_{max} y VO_{2max} reveló un efecto mayor del entrenamiento SI que del entrenamiento LI (ES=1,20 y ES=1,54, respectivamente).

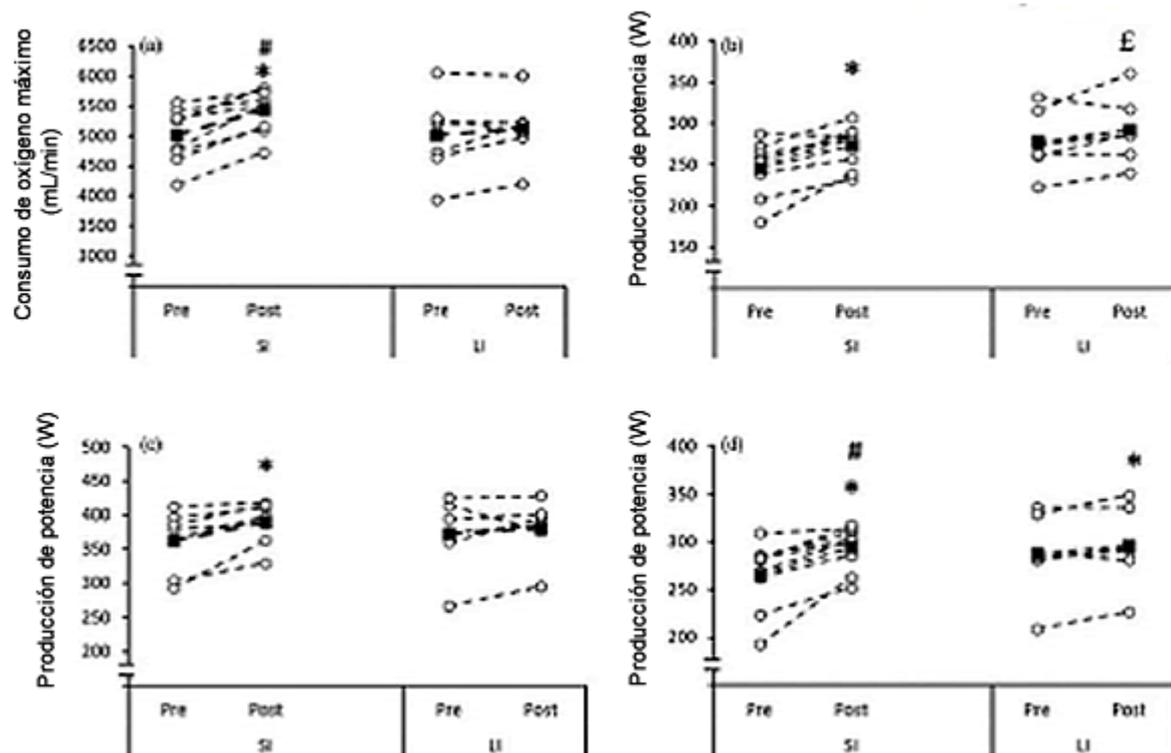


Figura 2. Datos Individuales para (a) consumo de oxígeno máximo, (b) producción de potencia (W) en una concentración de lactato de 4 mmol/L, (c) producción de potencia media durante el test máximo de 5 min y (d) producción de potencia media durante el test máximo de 40-min antes (Pre) y después (Post) del período de intervención en el grupo con intervalos cortos (SI) y el grupo con intervalos largos (LI). Los datos señalados en negrita con cuadrados negros representan los valores medios para cada conjunto de datos. * Mayor que el valor Pre ($P < 0,05$). * El cambio con respecto al valor obtenido antes de la intervención de entrenamiento (Pre) es mayor que en el grupo LI ($P < 0,05$). £ Se observó una tendencia hacia un incremento ($P < 0,08$).

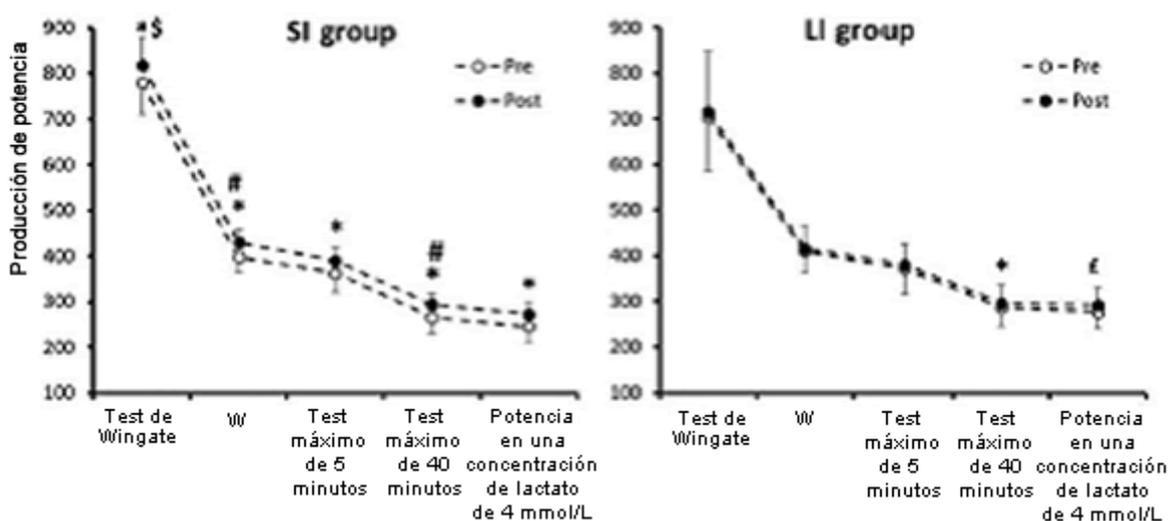


Figura 3. Perfil de potencia antes (Pre) y después (Post) del período de intervención en el grupo que realizó entrenamiento con intervalos cortos (grupo SI, panel de la izquierda) y el grupo que realizó el entrenamiento con intervalos largos (grupo LI, panel de la derecha). Es importante destacar que el eje x no es continuo y está compuesto por tests con diferentes duraciones. * Significativamente mayor que el valor Pre ($P < 0,05$); £ se observa una tendencia a ser mayor que el valor Pre ($P = 0,08$), # El cambio con respecto a Pre es mayor en el grupo LI ($P < 0,05$); \$ El cambio con respecto al valor Pre tiende a ser mayor que en el grupo LI

Producción de potencia en una concentración de lactato de 4 mmol/L

El grupo SI aumentó la producción de potencia en la concentración de lactato de 4 mmol/L un $12\% \pm 9\%$ ($P < 0,01$), y se observó una tendencia hacia un aumento en el grupo LI ($5\% \pm 6\%$, $P = 0,08$; Figura 2), no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos en los cambios ($P = 0,12$), pero el análisis de ES reveló un efecto práctico moderado del entrenamiento SI en comparación con el entrenamiento LI ($ES = 0,86$). No se observaron diferencias entre los grupos en la eficiencia bruta ni en la economía de ciclismo, y no se observaron cambios en estos parámetros en ninguno de los grupos durante el período de intervención. La eficiencia bruta en la producción de potencia de 125, 175 y 225 W fue $16,6\% \pm 1,3\%$, $18,2\% \pm 1,0\%$ y $19,0\% \pm 1,0\%$, respectivamente, mientras que la economía de ciclismo en estas producciones de potencia fue $0,232 \pm 0,022$, $0,211 \pm 0,019$, y $0,200 \pm 0,019$ mL/kg/W, respectivamente, expresados en forma de valores medios en los grupos y momentos de intervención.

Producción de potencia en los test máximos

Tanto el grupo SI como el grupo LI aumentaron su producción de potencia media durante el test máximo de 40 minutos ($12\% \pm 10\%$ vs $4\% \pm 4\%$), respectivamente, $P \leq 0,05$ Figura 2). Se observó una tendencia hacia un mayor aumento relativo en la producción de potencia media durante el test máximo de 40 min en el grupo SI ($P = 0,056$) y el ES del aumento relativo reveló un efecto moderado del entrenamiento SI en comparación con el entrenamiento LI ($ES = 1,09$). Los valores de la concentración de lactato obtenidos después de los tests máximos de 40 min no fueron diferentes entre los grupos SI y LI, ni en las mediciones previas al entrenamiento (Pre) ($11,8 \pm 2,4$ y $11,5 \pm 3,4$ mmol/L, respectivamente) ni en las posteriores al mismo (Post) ($11,5 \pm 2,7$ y $10,8 \pm 3,2$ mmol/L, respectivamente). La concentración de lactato media de los primeros 20 minutos del test máximo de 40 min que se realizó luego del entrenamiento (Post) presentó una tendencia hacia valores más altos en el grupo SI que en el grupo LI ($6,2 \pm 1,6$ vs $4,5 \pm 1,6$ mmol/L, respectivamente, $P = 0,07$) pero no se observaron diferencias en los valores medios de la concentración de lactato durante los últimos 20 minutos del test ($9,1 \pm 2,1$ vs $7,9 \pm 3,4$ mmol/L respectivamente $P = 0,4$). Ni en las mediciones pre entrenamiento ni en las post entrenamiento se observaron diferencias entre los grupos en los valores de la concentración de lactato inmediatamente luego del test máximo de 40 min (pre: $11,8 \pm 2,4$ vs $11,5 \pm 3,4$ mmol/L respectivamente; post: $11,5 \pm 2,7$ y $10,8 \pm 3,2$ mmol/L, respectivamente). El entrenamiento SI mejoró la producción de potencia media durante el test máximo de 5 min en un $8\% \pm 7\%$ ($P < 0,01$, Figura 2) pero no se observaron cambios significativos luego del entrenamiento LI ($3\% \pm 7\%$, $P = 0,05$; Figura 2). No se observaron diferencia estadísticamente significativas entre los grupos en el cambio relativo pero el ES del aumento relativo reveló un efecto moderado del entrenamiento SI en comparación con el entrenamiento LI ($ES = 0,71$). El incremento de $5\% \pm 3\%$ en la producción de potencia media durante el test de Wingate de 30 segundos en el grupo SI (de 775 ± 66 a 811 ± 61 W, $P < 0,01$) presentó una tendencia a ser mayor ($P = 0,10$) que el cambio no significativo de $1,4\% \pm 3,7\%$ observado en el grupo LI (de 703 ± 119 a 715 ± 133 W, $P = 0,3$). El ES del aumento relativo reveló un efecto moderado del entrenamiento SI vs el entrenamiento LI ($ES = 1,03$). El incremento promedio en la producción de potencia en los 5 tests fue $6,9\%$ mayor en el grupo SI ($10,0\% \pm 5,8\%$ de aumento) que en el grupo LI ($3,1\% \pm 3,2\%$ de aumento, $P < 0,05$; Figura 3). El ES del aumento relativo medio reveló un efecto mayor del entrenamiento SI que del entrenamiento LI ($ES = 1,47$).

DISCUSION

El principal hallazgo del estudio presente fue que realizar HIT en forma de SI (intervalos cortos) indujo adaptaciones de entrenamiento superiores en varias mediciones de resistencia y de rendimiento en comparación con el HIT en forma de LI (intervalos largos) a pesar de que el esfuerzo y el tiempo de trabajo fueron similares durante las sesiones de HIT. Los ciclistas del grupo SI presentaron un mayor aumento relativo en VO_{2max} , W_{max} , producción de potencia media durante el test de Wingate de 30 s, y presentaron una tendencia a experimentar aumentos mayores en la producción de potencia en la [La-] igual a 4 mmol/L y en la producción de potencia media durante el test máximo de 40-min en comparación con los ciclistas del grupo LI. Además, el ES de la mejora relativa en todos los parámetros medidos reveló un efecto moderado a grande del entrenamiento SI versus el entrenamiento LI.

El estudio presente usó esfuerzos similares entre los grupos en lugar de utilizar valores similares de trabajo total y consumo de energía en los grupos. Se ha sugerido que las valoraciones realizadas con esfuerzos similares se asemejan más a la manera en que los atletas realizan típicamente sus entrenamientos (Seiler et al., 2013). En el trabajo presente, la similitud en los esfuerzos se pudo evidenciar por las puntuaciones similares de RPE y de [La-] en los dos grupos después de las sesiones de HIT. El efecto superior observado después del entrenamiento SI comparado al del entrenamiento LI es algo

que se contradice con lo observado en estudios anteriores que han informado mejoras similares con los dos regimenes de entrenamiento (Stepto et al., 1999; Laursen et al., 2002; Laursen et al., 2005; Heigerud et al., 2007). Una posible causa de estos resultados diferentes podría ser que el estudio presente usó un período de intervención más largo, lo que aumenta la probabilidad de detectar efectos de diferencias pequeñas en el estímulo de entrenamiento, sobre todo entre los atletas entrenados. El período de intervención en esta investigación duró 10 semanas, mientras que en los otros estudios con los que se plantean las comparaciones tuvo una duración de sólo 3-4 semanas (Stepto et al., 1999; Laursen et al., 2002; Laursen et al., 2005) o 8 semanas (Heigerud et al., 2007). Por otra parte, existen otras diferencias, en el diseño de los protocolos de SI que podrían contribuir a explicar la superioridad del grupo SI en el estudio presente, y esto podría ser un factor importante a tener en cuenta cuando se diseñan los programas de entrenamiento intervalado. La relación 2:1 trabajo:recuperación y la duración suficientemente larga de cada serie (9,5 min) permiten que los ciclistas alcancen un estrés cardiovascular relativamente grande.

El protocolo de SI utilizado en el estudio de Heigerud et al. (2007) contemplaba períodos de trabajo de 15 s alternados con períodos de recuperación activos de 15 s, y se ha observado que el tiempo por encima de 90% de VO_{2max} es mayor durante una sesión de SI cuando la duración de los períodos de trabajo es de 30 s, (como en este estudio), que durante los períodos de trabajo más cortos (Rozenek et al., 2007; Wakefield y Glaister, 2009). Además, se ha indicado que una relación trabajo:recuperación de 1:1 induce menos tiempo transcurrido por encima de 90% de VO_{2max} que la relación 2:1 utilizada en el estudio presente (Rozenek et al., 2007). Esto probablemente está relacionado con un mayor tiempo necesario para alcanzar el 90% de VO_{2max} debido a los períodos cortos de trabajo junto con períodos de recuperación más largos. Sobre la base de estas razones, sugerimos que el mayor estímulo de entrenamiento (tiempo por encima de 90% de VO_{2max}) durante el presente protocolo de entrenamiento SI fue la principal causa de las mayores adaptaciones de VO_{2max} del grupo SI en comparación con el grupo LI. Además, los participantes del estudio de Helgerud et al. (2007) estaban moderadamente entrenados (VO_{2max} aprox. 55-60 mL/kg/min) y por lo tanto un menor estímulo de entrenamiento podría ser adecuado. Los ciclistas del presente estudio parecen tener un estado de entrenamiento mayor (VO_{2max} aprox. 66 mL/kg/min) y a medida que aumenta el nivel de aptitud física también se incrementa la importancia del HIT y la calidad del entrenamiento que se necesita para mejorar el rendimiento. (Midgley et al., 2006).

Algunos otros estudios han utilizado intervalos de trabajo similares a los del protocolo de entrenamiento SI del estudio presente (Stepto et al., 1999; Laursen et al., 2002; Laursen et al., 2005). Sin embargo, la combinación de intensidad de trabajo más alta (175% de PVO_{2max}) con un período de recuperación más largo (4,5 min) en estos estudios podría haber provocado un estrés insuficiente en el sistema cardiovascular de los ciclistas entrenados. En consecuencia, los períodos de trabajo deben alcanzar por lo menos 2-3 min para que se logren las adaptaciones de entrenamiento suficientes en la función cardíaca (Buchheit y Laursen, 2013). Si los períodos de trabajo de 30-s se hubieran repetido durante un tiempo suficiente con períodos de recuperación intermitentes y mas cortos, como la organización presente con intervalos de trabajo de 30-s intercalados con períodos de recuperación activos de 15-s, se habría puesto un estímulo aun mayor en el sistema cardiovascular, lo que probablemente habría provocado adaptaciones superiores. Sin embargo, la reducción del período de recuperación produce una menor intensidad de ejercicio durante los períodos de trabajo, y el potencial ergogénico de los esfuerzos supramáximos ha sido observado tanto en personas desentrenadas como en personas entrenadas (Burgomaster et al, 2008; Psilander et al., 2010). Este efecto ergogénico se debería principalmente al aumento en el potencial de oxígeno dentro de los músculos que están realizando el ejercicio. Esto último ha sido sustentado por uno de los pocos estudios que incluyeron datos de tejido muscular de ciclistas bien entrenados, en el cual se reveló que los marcadores genéticos corriente arriba de la biogenesis mitocondrial aumentan en una magnitud similar luego de 7 esfuerzos de trabajo máximos de 30 s (períodos de recuperación de 4-min entre ellos) y luego de 3 períodos de trabajo de 20-min a ~87% de VO_{2max} (Psilander., 2010). Es posible sugerir que disminuyendo la intensidad de ejercicio a PVO_{2max} y disminuyendo ampliamente los períodos de recuperación de 4,5 min a 15 s se permita que los ciclistas alternen continuamente entre trabajo y recuperación durante un período relativamente largo. Esto podría provocar un estímulo mucho mayor sobre el sistema cardiovascular (Rønnestad y Hansen, 2013) y podemos suponer que la menor intensidad de ejercicio {100% contra 175% de PVO_{2max} } podría compensarse con la mayor duración del mismo (es decir, un volumen mayor) y así inducir un estímulo de ejercicio superior tanto en el sistema cardiovascular como en el potencial de oxígeno muscular local.

El presente estudio no contempló el análisis de tejido muscular por lo que es difícil plantear comentarios sobre las adaptaciones locales de los músculos que se encuentran realizando ejercicios. Se ha sugerido que la intensidad del ejercicio es el factor clave para la activación del regulador maestro de la biogenesis mitocondrial, el co-activador 1α del receptor gama activado del proliferador de peroxisomas (PGC- 1α) (revisado en Gibala et al., 2012). Varias vías involucradas en la activación de PGC- 1α , como la proteína quinasa activada por monofosfato de adenosina y la proteína quinasa II dependiente de calcio/calmodulina, se activarían de manera intensidad-dependiente (Egan et al., 2010). También se ha indicado que la mayor activación del ARN mensajero de PGC- 1α se debería principalmente a los aumentos en el reclutamiento muscular (Edgett et al., 2013). Si bien es muy especulativo, podría suponerse que el grupo SI que realmente realizó ejercicio en una intensidad aproximada a PVO_{2max} logró un estímulo en la biogénesis mitocondrial mayor que el

grupo LI, que tenía una menor intensidad de ejercicio debido a los períodos de trabajo continuo más largos. Uno de los mecanismos que sustentan la importancia del HIT en el rendimiento de resistencia podría estar relacionado con una mayor exposición al lactato, dado que se ha sugerido que aumenta la biogénesis mitocondrial y la expresión de transportadores de lactato (Brooks, 2009). A pesar de los valores similares de [La-] después de las sesiones de HIT en el estudio presente, podría especularse que las sesiones de SI (3,0 x 9,5 min) que tuvieron una mayor duración continua con elevada [La-], proporcionaron un estímulo mejor que el estímulo más corto continuo (aunque más frecuente) alcanzado durante las sesiones de LI (4 x 5 min). Weston et al. (1997) observaron una mayor capacidad buffer muscular después de una intervención de HIT intervalado en ciclistas altamente entrenados. Además, los autores observaron una correlación entre la capacidad buffer muscular y el rendimiento en pruebas contrarreloj de 40 km. De manera similar, Laursen et al. (2005) observaron que diferentes intervalos de HIT aumentaron la capacidad de los ciclistas de tolerar el lactato, algo que se manifestó como una mayor [La-] durante una prueba contrarreloj de 40-km. De hecho el último estudio no observó ninguna diferencia significativa entre SI y LI. Por otra parte, el protocolo de SI fue 12% x 175% de Wmax con períodos de recuperación de 4,5-min, y por consiguiente podría ser que el protocolo SI del estudio presente haya inducido un mayor volumen de estrés por lactato. Por consiguiente, podría especularse que una mayor exposición al estrés láctico podría afectar positivamente las adaptaciones musculares. De hecho, en el estudio presente durante la primera la mitad de la prueba contrarreloj de 40-min realizada luego del entrenamiento (Post), la [La-] del grupo SI presentó una tendencia a ser mayor que la del grupo LI. Esto podría ser interpretado como una mayor tolerancia al lactato en el grupo SI y nosotros suponemos que esto puede explicar algunas de las mejoras de rendimiento en este grupo. Lamentablemente, la [La-] no se midió regularmente antes del entrenamiento (Pre); por lo tanto es necesario tener cuidado al interpretar la comparación entre los grupos luego del entrenamiento (Post). Sin embargo, la [La-] al final del test máximo de 40-min fue similar en los dos grupos tanto en las mediciones Pre como en las mediciones Post, lo que significa que no existieron diferencias entre los grupos en la producción máxima de [La-]. Por lo tanto, es posible comparar las mediciones Post en los grupos, en donde los resultados nos pueden dar algún panorama sobre los mecanismos potenciales que se encuentran por detrás de las adaptaciones observadas. Una mayor tolerancia al lactato podría teóricamente estar relacionada con el aumento favorable en la producción de potencia y en Wmax en el test de Wingate de 30-s y en la potencia media durante el test máximo de 5-min.

Se ha sugerido que tiempo transcurrido en una intensidad de ejercicio alta (es decir, PVO_{2max}) podría tener un efecto aditivo en las adaptaciones musculares (Noakes, 1991; Denadai et al., 2006). Por consiguiente, podría suponerse que el presente protocolo de SI, con una producción de potencia más alta y numerosas fases de aceleración (comienzo de cada intervalo de trabajo de 30-s), impone un estímulo mayor sobre el sistema neuromuscular que el protocolo LI. Esto puede ser evidente por la mejora superior en la producción de potencia media en el test de Wingate de 30 s en los ciclistas del grupo SI. Debemos mencionar que el protocolo SI, con intervalos de trabajo de 30 s es más específico del test de Wingate que el protocolo LI con intervalos de trabajo de 5 min. Por otro lado, el protocolo de LI es más específico del test máximo de 5 min, y aún en este test el entrenamiento SI fue superior al entrenamiento LI.

El hecho que LI no presentara mejoras en todas las mediciones después de 10 semanas con dos sesiones de HIT por semana, es algo inesperado. Sin embargo, es importante recordar que los ciclistas en ambos grupos habían realizado aproximadamente una sesión de HIT durante por lo menos las últimas 4 semanas previas al comienzo de la intervención. En la mayoría de los estudios donde se ha informado que los ciclistas entrenados experimentaron mejoras significativas en las mediciones de resistencia después de realizar dos sesiones de HIT por semana, los ciclistas comenzaron el período de intervención sin haber realizado entrenamiento HIT durante las últimas 4-8 semanas (por ejemplo, Weston et al., 1997; Stepto et al., 1999; Rønnestad et al., 2012). El potencial para lograr mejoras en el rendimiento de resistencia después de un período de intervención basado en HIT es mayor cuando no se ha realizado ningún HIT durante 1 o 2 meses previos (Seiler et al., 2013). Debido a que el grupo LI realizó sus sesiones de HIT con una menor producción de potencia, esperábamos que sus mejoras se produjeran en la región de menor producción de potencia del perfil de potencia (Figura 3). Notablemente el entrenamiento SI presentó mejoras en todas las regiones del perfil de potencia (Figura 3), lo que indica un estímulo eficaz para múltiples adaptaciones, así como también una mejor función neuromuscular, mayor capacidad buffer, mejores funciones cardiovasculares y mayor potencial de oxígeno muscular.

En conclusión, el estudio presente indica que la realización del presente protocolo de HIT con SI induce adaptaciones de entrenamiento superiores, después de 10 semanas en comparación con el HIT realizado siguiendo un protocolo LI más clásico, constituido por 4 intervalos de trabajo de 5-min. Esto se pudo evidenciar a partir del ES que mostró un efecto moderado a grande del entrenamiento SI en comparación con el entrenamiento LI en todos los aspectos del perfil de potencia.

Perspectivas

La importancia del HIT para mejorar el rendimiento de resistencia en los atletas altamente entrenados ya ha sido establecida (ej. Laursen, 2010). El trabajo continuo en tales intensidades altas no puede ser mantenido durante mucho tiempo y por consiguiente se han usado varios protocolos de intervalos, que varían de SI a LI, para acumular un estímulo

de entrenamiento adecuado. No está claro cual es la mejor manera de organizar los intervalos de HIT. Después de 10 semanas de entrenamiento que incluía dos sesiones semanales de HIT, se observó que el presente protocolo de SI fue superior al protocolo de LI con respecto tanto a la región de potencia elevada como a la región de menor potencia del perfil de potencia de los ciclistas. El presente protocolo de SI consistió en períodos de trabajo de 30-s a aproximadamente la intensidad de PVO₂mas separados por períodos de recuperación de 15 s consecutivamente durante 9,5 min, seguidos por períodos de recuperación de 2,5-min. Este período de 9,5-min fue realizado tres veces en una sesión de intervalos y puede ser recomendado como un buen método para organizar y optimizar una sesión de HIT.

AGREDECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Daniel Buck y Fredrik Engen por su ayuda en la recolección de los datos. También desean agradecer al dedicado grupo de ciclistas que hicieron que este estudio fuera posible. Este estudio recibió apoyo de la Federación Olímpica Noruega.

REFERENCIAS

1. Borg G.A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Med. Sci. Sports Exerc.*14:377-381.
2. Brooks G.A. (2009). Cell-cell and intracellular lactate shuttles. *J. Physiol.* 587: 5591-6000.
3. Buchheit M., Laursen P. B. (2013). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: part 1: cardiopulmonary emphasis. *Sports Med.* 43:313-338.
4. Burgomaster K.A., Howarth K.R., Phillips S.M., Rakobowchuk M.L., Macdonald M.J., McGee S.L, Gíbala M.J. (2008). Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. *J. Physiol.* 586: 151-160.
5. Coyle E. F, Sidossis I.S., Horowitz J.F., Beltz J.D. (1992). Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24: 782-788.
6. Daniels J., Scardina N., Hayes J., Foley P. (1984). Elite and sub-elite female middle- and long-distance runners. In: *Landers DM. ed. Sport and elite performers. Champaign, IL: Human Kinetics.* 57-72.
7. Denadai B.S., Ortiz M.J., Greco C.C, de Mello M.T. (2006). Interval training at 95% and 100% of the velocity at V_{O2} max: effects on aerobic physiological indexes and running performance. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 31: 737-743.
8. Edgett B.A., Foster W.S., Hankinson P.B., Simpson C.A., Little J.P., Graham R.B., Gurd B.J. (2013). Dissociation of increases in PGC-1 α and its regulators from exercise intensity and muscle activation following acute exercise. *PLoS ONE:* 8: e71623.
9. Egan B., Carson B.P., Garcia-Roves P.M., Chibalin A.V., Sarsfield P.M., Barron N., McCaffrey N., Moyna N.M., Zierath J.R., O'Gorman D.J. (2010). Exercise intensity-dependent regulation of peroxisome proliferator-activated receptor coactivator-1 mRNA abundance is associated with differential activation of upstream signaling kinases in human skeletal muscle. *J. Physiol.*588: 1779-1790.
10. Foss Ø, Hallen J. (2005). Cadence and performance in elite cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol.* 93:453-462.
11. Foster C. (1998). Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30: 1164-1168.
12. Fox E.L, Bartels R.L., Billings C.E., Mathews D. K., Bason R., Webb W. M. (1973). Intensity and distance of interval training programs and changes in aerobic power. *Med. Sci. Sports.*5: 18-22.
13. Gibala M.J., Little J.P, Macdonald M.J, Hawley JA. (2012). Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. *J. Physiol.* 590: 1077-1084.
14. Gunnarsson T.P., Bangsbo J. (2012). The 10-20-30 training concept improves performance and health profile in moderately trained runners. *J. Appl. Physiol.*113: 16-24.
15. Helgerud J., Høydal K., Wang E., Karlsen T., Berg P., Bjerkaas M., Simonsen T., Helgesen C., Hjorth N., Bach R., Hoff J. (2007). Aerobic high-intensity intervals improve VO₂max more than moderate training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 39: 665-671.
16. Hopkins W.G., Marshall S.W., Batterham A.M., Hanin J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med. Sci. Sports Exerc.*41:3-13.
17. Iaia F.M., Thomassen M., Kolding H., Gunnarsson T., Wendell J., Rostgaard T., Nordsborg N., Krstrup P., Nybo L., Hellsten Y., Bangsbo J. (2008). Reduced volume but increased training intensity elevates muscle Na⁺-K⁺ pump α 1-subunit and NHE1 expression as well as short-term work capacity in humans. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 294: 966-974.
18. Jeukendrup A.K., Craig N.P., Hawley J.A. (2000). The bioenergetics of World Class Cycling. *J. Sci. Med. Sport* 3: 414-433.
19. Laursen P.B. (2010). Training for intense exercise performance: high-intensity or high-volume training. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 20: 1-10.
20. Laursen P.B., Jenkins D.G. (2002). The scientific basis for high-intensity interval training: optimizing training programs and maximizing performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med.* 32: 53-73.
21. Laursen P.B., Shing C.M., Peake J.M., Coombes J.S., Jenkins D.G. (2002). Interval training program on optimization in highly

- trained endurance cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.*34: 1801-1807.
22. Laursen P.B., Shing C.M., Peake J.M, Coombes J.S, Jenkins D.G. (2005). Influence of high-intensity interval training on adaptations in well-trained cyclists. *J. Strength Cond. Res.* 19: 527-533.
 23. Lindsay F.H., Hawley J.A, Myburgh K.H., Schomer H.H, Noakes I.D, Dennis S.C. (1996). Improved athletic performance in highly trained cyclists after interval training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28: 1427-1434.
 24. MacDougall D., Sale D. (1981). Continuous vs. interval training: a review for the athlete and the coach. *Can. J. Appl. Sport Sci.*6:93-97.
 25. Midgley A.W, McNaughton L.R. (2006). Time at or near VO₂max during continuous and intermittent running. A review with special reference to considerations for optimization of training protocols to elicit the longest time at or near VO₂max. *J. Sports Med. Phys. Fitness.*46: 1-14.
 26. Midgley A.W, McNaughton L.R, Wilkinson M. (2006). Is there an optimal training intensity for enhancing the maximal oxygen uptake of distance runners? Empirical research findings, current opinions, physiological rationale and practical recommendations. *Sports Med.* 36: 117-132.
 27. Noakes T.D. (1991). Lore of running. Champaign, IL: Leisure Press. 450.
 28. Psilander N, Wang L, Westergren J., Tonkonogi M., Sahlin K. (2010). Mitochondrial gene expression in elite cyclists: effects of high-intensity interval exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 110: 597-606.
 29. Rønnestad B.R. (2013). Comparing two methods to assess power output associated with peak oxygen uptake in cyclists. *J. Strength Cond. Res.* doi: 10.1519/JSC.Ob013e3182987327.
 30. Rønnestad B.R, Ellefsen S., Nygaard H., Zacharoff E.E., Vikmoen O., Hansen J., Hallen J. (2012). Effects of 12 weeks of block periodization on performance and performance indices in well-trained cyclists. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* doi: 10.1111/sms.12016.
 31. Rønnestad B.R, Hansen H.A., 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.
 32. Rønnestad B.R, Hansen E.A., Raastad T. (2011). Strength training improves 5-min all-out performance following 185 min of cycling. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 21:250-259.
 33. Rønnestad B.R, Hansen J. (2013). Optimizing interval training at power output associated with peak oxygen uptake in well-trained cyclists. *J. Strength Cond. Res.* doi: 10.1519/JSC.Ob013e3182a73e8a.
 34. Rozenek R, Funato K, Knbo J, Hoshikawa M, Matsuo A. Physiological responses to interval training sessions at velocities associated with VO₂max. *J Strength Cond Res* (2007). 21: 188-192.
 35. Seiler S., Jøranson K., Olesen B.V., Hetlelid K.J. (2013). Adaptations to aerobic interval training: interactive effects of exercise intensity and total work duration. *Scand. J. Med. Sci. Sports:* 23: 74-83.
 36. Shephard R.J. (1968). Intensity, duration and frequency of exercise as determinants of the response to a training regime. *Int. Z. Angew. Physiol.:* 26: 272-278.
 37. Stepto N.K, Hawley J.A., Dennis S.C., Hopkins W.G. (1999). Effects of different interval-training programs on cycling time-trial performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*31:736-741.
 38. Tabala I., Nishimura K., Kouzaki M., Hirai Y., Ogita F., Miyachi M. Yamamoto K. (1996). Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and VO₂max. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28: 1327-1330.
 39. Thevenet D., Tardieu-Berger M., Berthoin S., Prioux J. (2007). Influence of recovery mode (passive vs. active) on time spent at maximal oxygen uptake during an intermittent session in young and endurance-trained athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.*99: 133-142.
 40. Tschakert G., Hofmann P. (2013). High-intensity intermittent exercise — methodological and physiological aspects. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 8: 600-610.
 41. Wakefield B.R., Glaister M. (2009). Influence of work-interval intensity and duration on time spent at a high percentage of VO₂max during intermittent supramaximal exercise. *J. Strength Cond. Res.* 23: 2548-2554.
 42. Wenger H.A., Bell G.J. (1986). The interactions of intensity, frequency and duration of exercise training in altering cardiorespiratory illness. *Sports Med.*3: 346-356.
 43. Westgarth Taylor C, Hawley J.A., Rickard S, Myburgh K.H., Noakes I.D., Dennis S.C. (1997). Metabolic and performance adaptations to interval training in endurance-trained cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 75: 298-304.
 44. Weston A.R., Myburgh K.H., Lindsay F.H., Dennis S.C, Noakes T.D, Hawley J.A. (1997). Skeletal muscle buffering capacity and endurance performance after high-intensity interval training by well-trained cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol Occup. Physiol.* 75: 7-13.

Cita Original

Rønnestad B. R., Hansen J., Vegge G., Tønnessen E., Slettaløkken G.. Short intervals induce superior training adaptations compared with long intervals in cyclists - An effort-matched approach. (2014). *Scand. J. Med. Sci. Sports.*