

Article

El Entrenamiento Polarizado Ejerce un Mayor Impacto sobre las Variables Claves para la Resistencia al que Ejercen los Entrenamientos Umbral, de Alta Intensidad y de Alto Volumen

Thomas Stoggl^{1,2} y Billy Sperlich³¹Department of Sport Science and Kinesiology, University of Salzburg, Salzburg, Austria.²Department of Health Sciences, Swedish Winter Sports Research Centre, Mid Sweden University, Östersund, Suecia.³Institute of Sport Science, University of Würzburg, Würzburg, Alemania.

RESUMEN

Los atletas de resistencia integran cuatro conceptos de acondicionamiento en sus programas de entrenamiento: entrenamiento con alto-volumen (HVT), "entrenamiento umbral" (THR), entrenamiento intervalado de alta intensidad (HIIT) y una combinación de estos conceptos mencionados que se conoce como entrenamiento polarizado (POL). El propósito de este estudio fue explorar cual de estos cuatro conceptos de entrenamiento produce la mayor respuesta sobre los componentes claves del rendimiento de resistencia en los atletas de resistencia altamente entrenados. **Métodos:** Cuarenta y ocho corredores, ciclistas, triatletas y esquiadores de fondo (*cross country*) (consumo de oxígeno máximo: (VO_{2max}): $62,6 \pm 7,1$ ml $min^{-1} kg^{-1}$) fueron asignados al azar a uno de los cuatro grupos de entrenamiento durante 9 semanas. Se realizó un test incremental, un test de economía de trabajo y un test de VO_{2max} . La intensidad de entrenamiento se controló en función de la frecuencia cardiaca. **Resultados:** El grupo POL presentó el mayor aumento en VO_{2max} (+6,8 ml $min^{-1} kg^{-1}$ o 11,7%, $P < 0,001$), tiempo hasta el agotamiento durante el protocolo incremental (+17,4%, $P < 0,001$) y velocidad/potencia máxima (+5,1%, $P < 0,01$). La velocidad/potencia a 4 mmol. L^{-1} aumento después de POL (+8,1%, $P < 0,01$) y HIIT (+5,6%, $P < 0,05$). No se encontraron diferencias entre los grupos en los cambios pre vs post en la economía de trabajo. La masa corporal se redujo en un 3,7 % ($P < 0,001$) luego del HIIT pero no se observaron cambios en los otros grupos. Con excepción de mejoras ligeras en la economía de trabajo en THR, tanto HVT como THR no produjeron efectos adicionales en las variables determinadas de rendimiento de resistencia ($P > 0,05$). **Conclusión:** El entrenamiento POL produjo las mayores mejoras en la mayoría de las variables claves para el rendimiento de resistencia en los atletas de resistencia altamente entrenados. THR o HVT no produjeron mejoras adicionales en las variables relacionadas al rendimiento.

Palabras Clave: Umbral del lactato, potencia máxima, consumo de oxígeno máximo, tiempo hasta el agotamiento, economía de trabajo

INTRODUCCIÓN

Los atletas que participan en los deportes de resistencia como carreras, ciclismo y esquí de fondo integran cuatro conceptos de acondicionamiento en sus programas de entrenamiento para aumentar al máximo el rendimiento deportivo. El primer concepto de acondicionamiento es el ejercicio prolongado de baja intensidad y alto-volumen (HVT). El segundo es entrenar cerca o en el umbral del lactato (THR); el tercero es el entrenamiento intervalado de alta intensidad y bajo volumen (HIIT) y el cuarto concepto es una combinación de los conceptos mencionados que se conoce como entrenamiento "polarizado" (POL). Hay un debate sobre cual de estos conceptos de entrenamiento es el mejor para maximizar las adaptaciones y el rendimiento.

Se cree que el HVT ejecutado con baja intensidad (LOW) [aproximadamente 65-75% del consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}) <80% de frecuencia cardiaca máxima (HR_{max}) o en una concentración de lactato sanguíneo < 2 mmol. L⁻¹ (Laursen y Jenkins, 2002.; Seiler y Kjerland, 2006)] y con una duración prolongada es un concepto de entrenamiento fundamental en la preparación para los eventos de resistencia. Este tipo de ejercicio mejora el VO_{2max} a través del incremento en el volumen sistólico y del volumen de plasma y de la inducción de adaptaciones moleculares para la biogénesis capilar y mitocondrial lo que aumenta la eficiencia de componentes metabólicos claves para la provisión de energía (Romijn et al, 1993; Midgley et al, 2006).

El HIIT ha revelado grandes mejoras en el rendimiento deportivo y en las variables claves relacionadas a la resistencia (por ejemplo, tiempo hasta el agotamiento, rendimiento en pruebas contrarreloj, VO_{2max} , velocidad de carrera máxima y submáxima, economía de carrera) tanto en los individuos entrenados como en los desentrenados (Laursen y Jenkins, 2002). Estas mejoras se debieron principalmente a los aumentos en la disponibilidad, extracción y utilización de O₂ y s aumentos en VO_{2max} (Daussin et al., 2007; Helgerud et al, 2007). Un bloque condensado de 2 semana de 10-13 sesiones de HIIT provoco un incremento de 7 % en VO_{2max} (Stølen et al, 2005).

El entrenamiento en o cerca del umbral del lactato (LT) (Faude et al, 2009), llamado "entrenamiento umbral o threshold training", mejora el rendimiento de resistencia, particularmente en los participantes desentrenados (Denis et al, 1984; Londeree, 1997). Sin embargo, los esquiadores de esprint de fondo de clase mundial de Noruega presentaron un volumen de entrenamiento mayor cerca del LT en comparación con los esquiadores de nivel nacional (Sandbakk et al, 2011). Además, en los esquiadores de fondo de élite se observaron mejoras en la velocidad de carrera en el umbral del lactato y en el rendimiento en una carrera de 20 min cuando realizaron ejercicio a una intensidad que producía 3-4 mmol.L⁻¹ de lactato en comparación con una intensidad de entrenamiento menor (<3-4mmol.L⁻¹) (Evertsen et al, 2001). En contraste, los datos experimentales y correlacionales de los atletas altamente entrenados sugieren que el tiempo de entrenamiento cercano al LT puede ser ineficaz, o incluso contraproducente (Esteve-Lanao et al, 2007; Guellich y Seiler, 2010).

El análisis retrospectivo de la intensidad, duración y frecuencia de la carga de entrenamiento de esquiadores de fondo de nivel internacional (Seiler y Kjerland, 2006), remeros (Steinacker et al, 1998), ciclistas (Schumacher y Mueller, 2002) y corredores (Billat et al, 2001; Esteve-Lanao et al, 2005) reveló que atletas de resistencia de élite completaron la mayoría de sus sesiones de entrenamiento anuales, ya sea a intensidades por debajo (~75% del volumen de entrenamiento total) o muy por encima (~15-20% del volumen de entrenamiento total) de sus umbrales de lactato (LT). Seis semanas de ciclismo con entrenamiento POL produjeron una adaptación sistémica mayor en atletas altamente entrenados en comparación con el entrenamiento THR (Neal et al, 2013). Sin embargo, ningún estudio ha investigado el concepto de POL en los atletas de resistencia altamente entrenados para determinar si este concepto puede ser superior a las estrategias de entrenamiento mencionadas previamente.

En muchos deportes de resistencia, se han usado cinco variables importantes como referencia para comparar el rendimiento deportivo en y entre atletas de resistencia: (i) VO_{2max} (Bassett y Howley, 2000); (ii) producción de velocidad/potencia en el umbral del lactato(V/P_{LT}) (Bassett y Howley, 2000; Midgley et al, 2007; Faude et al, 2009); (iii) la economía de trabajo (Di Prampero et al, 1986; Helgerud et al, 2001); (iv) velocidad de carrera máxima o producción de potencia máxima (V/P_{max}) (Midgley et al, 2007); y (v) tiempo hasta el agotamiento (TTE) (Laursen y Jenkins, 2002). El objetivo de este estudio fue comparar los efectos de cuatro conceptos de entrenamiento (HVT contra THR contra HIIT contra POL) sobre las variables claves para el rendimiento de resistencia mencionadas anteriormente en atletas altamente entrenados. Planteamos la hipótesis que los grupos POL y HIIT producirían mejoras superiores que los grupos HVT y THR.

MATERIALES Y MÉTODOS

Participantes

En este estudio participaron voluntariamente cuarenta y ocho atletas de resistencia de competición saludables que participaban en esquí de fondo, ciclismo, triatlón, carreras de media o larga distancia (Media \pm SD: edad: 31 \pm 6 años, masa corporal: 73,8 \pm 9 kg, talla: 180 \pm 8 centímetros). Todos los participantes eran atletas altamente entrenados [62,6 \pm 7,1 mL \cdot min⁻¹ \cdot kg⁻¹(rango: 52-75 mL min⁻¹ \cdot kg⁻¹)], acostumbrados a un trabajo de más de cinco sesiones por semana (10-20 h-sem-1) y frecuentemente habían participado en competencias de resistencia durante por lo menos 8-20 años. Los participantes eran miembros del equipo nacional austriaco de esquí de fondo (n = 8), o integraban los equipos de carreras (n = 21), triatlón (n = 4) o ciclismo (n = 15) en la actualidad o desde el año anterior al estudio actual. El análisis retrospectivo de los protocolos de entrenamiento durante los 6 meses previos al estudio reveló que ninguno de los participantes había realizado HIIT regularmente. Todos habían seguido un protocolo de entrenamiento HVT con un máximo de dos sesiones de entrenamiento THR por semana.

Sobre la base de los valores iniciales del VO_{2max} y del modo de entrenamiento de los participantes (carrera o ciclismo), los atletas fueron distribuidos al azar en grupos de HIIT, HVT, THR o POL. Al inicio del estudio no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los cuatro grupos con respecto a la edad, altura, masa corporal o VO_{2max}. Durante una visita inicial, se explicaron los detalles del estudio y requisitos para la participación y luego los participantes firmaron su consentimiento informado. El estudio recibió la aprobación del Comité de Ética de la Universidad de Salzburgo, Austria y cumplió con lo establecido en la Declaración de Helsinki.

Diseño

La intervención tuvo una duración de 9 semanas más 2 días en los cuales se realizaron las determinaciones pre y post intervención. Todos los atletas (n= 15 ciclistas; n= 3 triatletas) que realizaban entrenamiento de ciclismo entrenaron con su propia bicicleta y realizaron todas las pruebas en una bicicleta ergométrica (*Ergoline, Ergoselect 100P; Bitz, Alemania*) con sus calzados de ciclismo y sistemas de pedaleo propios. Otros atletas (n =16 corredores, n = 6 triatletas, n = 8 esquiadores de fondo) corrieron durante el estudio y realizaron las determinaciones pre y post intervención en una cinta rodante motorizada (*HP Cosmos, Saturno, Traunstein, Alemania*). Se solicitó a los participantes que no cambiaran su dieta a lo largo del período de entrenamiento y mantuvieran el entrenamiento de la fuerza, si el mismo era parte de sus programas de entrenamiento. La ingesta nutricional de los participantes no fue estandarizada ni controlada durante el estudio, pero se impidió la ingesta de nutrientes en las 3 h previas a la realización de las pruebas. La intensidad del entrenamiento se controló mediante la frecuencia cardíaca (HR) sobre la base del test incremental realizado al inicio del estudio: (i) Intensidad baja (LOW) (HR en un valor de lactato sanguíneo <2mmol.L⁻¹); (ii) LT (HR en un valor de lactato sanguíneo de 3-5mmol.L⁻¹); (iii) intensidad alta (HIGH) (>90% HR_{max})]. La HR se midió durante cada sesión de entrenamiento y los atletas registraron el modo de entrenamiento y la duración e intensidad del ejercicio en un diario. Como control y para realizar un análisis detallado, en todas las sesiones de entrenamiento la frecuencia cardíaca (HR) fue almacenada digitalmente y analizada retrospectivamente.

Intervención de HVT

El HVT incluyó tres bloques de 3 semanas de duración cada uno: 2 semanas de entrenamiento de alto volumen seguidas por 1 semana de recuperación (Figura 1A). Cada una de las dos semanas de entrenamiento de alto volumen incluyó seis sesiones de entrenamiento con tres sesiones de 90 min de intensidad baja (LOW), dos sesiones de 150-240 min de intensidad baja (LOW) (según el modo de entrenamiento: carrera, ciclismo, o esquí con rollers) y una sesión 60 min con intensidad LT usando diferentes tipos de entrenamiento intervalado (por ejemplo, 5 x 7 min con 2 min de recuperación, 3 x 15 min con 3 min de recuperación). La semana de recuperación incluyó tres sesiones de entrenamiento con dos sesiones de 90 min de intensidad baja y una sesión de 150-180 min con intensidad baja.

Intervención de THR

El THR incluyó tres bloques de 3 semanas de duración cada uno: 2 semanas de entrenamiento de alto volumen y alta intensidad seguidas por 1 semana de recuperación (Figura 1B). Las dos semanas de volumen alto y de intensidad alta incluyeron cada una seis sesiones de entrenamiento con dos sesiones intervaladas de 60 min en el umbral de lactato (LT) (5 x 6 min y 2 min de recuperación en el primer bloque, 6 x 7 min en el segundo bloque y 6 x 8 min en el último bloque), una sesión de 90 a LT con intervalos más largos (3 x 15 min con 3 min de recuperación activa en el primer bloque y 3 x 20 min para los dos bloques restantes), una sesión de 75 min con varios cambios de intensidad ("fartlek") (intensidades que producen una concentración de lactato sanguíneo de 1,5-5 mmol.L⁻¹) y dos sesiones de 90 min en intensidad baja. La semana de recuperación incluyó una sesión de 60 min con intensidad baja y dos sesiones intervaladas de 60 min en LT (5 x

6 min con 2 min de recuperación activa).

Intervención de HIIT

La HIIT incluyó bloques intervalados de 16 días con una semana de adaptación previa y una semana de recuperación después de cada bloque. La semana de adaptación incluyó dos sesiones de 60 min de HIIT, tres sesiones de 90 min de intensidad baja, una sesión de 120 min de intensidad baja y 1 día de recuperación. El bloque intervalado condensado de 16 días incluyó 12 sesiones de HIIT en 15 días, que integraban cuatro bloques de tres sesiones de HIIT durante tres días consecutivos seguidas por 1 día de recuperación. La semana de recuperación estuvo compuesta por cuatro sesiones de intensidad baja de 90 min y 3 días sin entrenamiento (no se presenta en la Figura 1D). Todas las sesiones de HIIT incluyeron una entrada en calor de 20 min a 75% de HR_{max} , 4 x 4 min a 90-95% de HR_{max} con 3 min de recuperación activa y una vuelta a la calma de 15 min a 75% HR_{max} siguiendo el protocolo propuesto antes (Helgerud et al., 2007). Las sesiones con intensidad baja duraron 90-150 min dependiendo del modo de entrenamiento (carrera vs ciclismo) en una intensidad que produjera una concentración de lactato sanguíneo $<2\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Intervención de POL

El POL incluyó tres bloques, de 3 semanas de duración cada uno: 2 semanas de entrenamiento de alto volumen y alta intensidad seguidas por 1 semana de recuperación (Figura 1C). La semana de volumen alto y de alta intensidad incluyó seis sesiones con dos sesiones de 60 min de HIIT, dos sesiones de larga duración de 150-240 min de intensidad baja (la duración fue según el modo de entrenamiento: ciclismo, carrera o esquí con rollers), que incluyeron seis a ocho esprints máximos de 5 seg separados al menos por 20 min, y dos sesiones de intensidad baja de 90 min. La semana de recuperación incluyó una sesión de HIIT de 60 min, una sesión de intensidad baja de 120-180 min y una sesión de intensidad baja de 90 min.

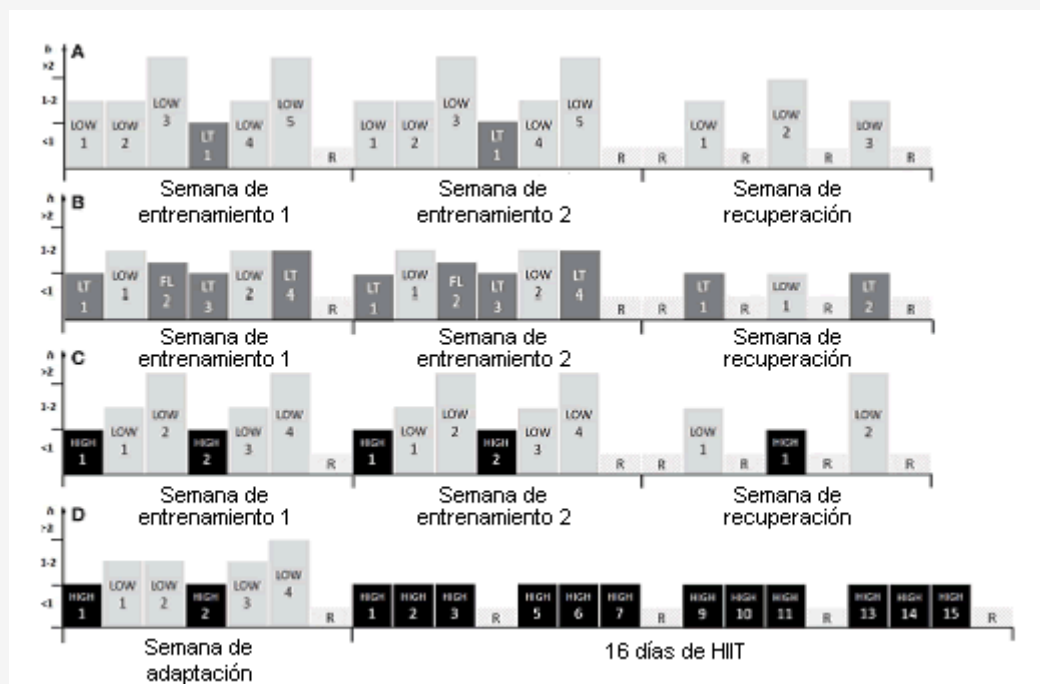


Figura 1. Programa de entrenamiento para 3 semanas de entrenamientos: (A) alto volumen (HVT), (B) umbral (THR), (C) polarizado (POL) y (D) programa de entrenamiento para el primer bloque de entrenamiento intervalado de alta intensidad (HIIT), sin semana de recuperación. LOW= Entrenamiento de baja intensidad ($<2\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$); LT= Entrenamiento realizado a una intensidad cercana al umbral del lactato ($3\text{-}5\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$); FL= fartlek; HIIT= Entrenamiento intervalado de alta intensidad ($>90\% HR_{max}$); R= Día de recuperación.

Evaluaciones Pre y Post

Se solicitó a todos los participantes que acudieran bien hidratados y se abstuvieran de consumir alcohol y cafeína durante

por lo menos 24 h, y de realizar ejercicio activo durante las 48 h previas a las pruebas. Las pruebas pre y post consistieron en la determinación de la masa corporal, realización de un protocolo de test incremental, un protocolo de incremental de evaluación de economía de trabajo y VO_{2max} .

El primer día, los participantes realizaron un test incremental en cinta rodante ($7,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; incrementos: $1,8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ cada 5 min, con etapas de recuperación de 30 seg., pendiente de 1%) o bicicleta ergométrica (80 W; incremento: 40 W cada 5 min, cadencia $>80 \text{ rpm}$) hasta que se alcanzara el agotamiento volitivo para determinar producción velocidad/potencia máxima (V/Pmax), HR, lactato sanguíneo así como también la producción de potencia/velocidad máxima y HR en una concentración de lactato sanguíneo de 2 y $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (V/P₂, V/P₄ y HR₂, HR₄). La HR de los participantes se registró por medio de telemetría (*Suunto t6, Helsinki, Finlandia*) en intervalos de 2 segundos. Para el análisis estadístico se utilizó la HR media de los últimos 30 seg de cada incremento. Se obtuvieron muestras de sangre de $20 \mu\text{l}$ del lóbulo de la oreja derecha con un tubo capilar (*Eppendorf AG, Hamburgo, Alemania*), inmediatamente después de cada incremento, y 3 y 5 min después de la realización de la prueba. Todas las muestras fueron analizadas con el método amperométrico-enzimático (*Biosen 5140, EKF-diagnostic GmbH, Magdeburg, Alemania*) por duplicado y para el análisis estadístico se utilizó el promedio de las dos mediciones. El sensor de lactato se calibró antes de cada prueba con una muestra estándar de lactato de $12 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. Se aceptaron los resultados dentro de un rango de $\pm 0,1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Un día después de los tests incrementales, todos los atletas realizaron un protocolo incremental combinado para economía de trabajo y VO_{2max} para determinar el VO_2 submáximo y máximo ($VO_{2submax}$ y VO_{2max}) y la HR (HR_{submax} y HR_{max}) y el tiempo hasta el agotamiento (TTE). Primero, la intensidad de la carrera se fijó en $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (pendiente: 5%) en la cinta rodante, y para el ciclismo en 200 W con una cadencia $>80 \text{ rpm}$ durante 10 min para determinar el $VO_{2submax}$ y HR_{submax} para esta intensidad. Se utilizaron los valores medios de VO_2 y HR durante los últimos 5 min de estas pruebas para los análisis estadísticos. Luego la intensidad aumentó cada 30 s $0,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (pendiente: 10%) en la cinta rodante o 15 W en la bicicleta ergométrica hasta el agotamiento. El tiempo total del test con incrementos se definió como el tiempo hasta el agotamiento (TTE). El VO_2 se midió respiración por respiración mediante un espirógrafo de circuito abierto (*nSpire, Zan 600 USB, Oberthulba, Alemania*) que fue calibrado antes de cada prueba con un gas de alta precisión (15,8% O_2 , 5% O_2 en N; *Praxair, Düsseldorf, Alemania*) y una jeringa de 1L (*nSpire, Oberthulba, Alemania*). Todos los datos respiratorios fueron promediados cada 30 seg. El VO_{2max} se alcanzaba si se cumplían tres de los cuatro siguientes criterios: (1) un *plateau* en VO_2 , es decir, un aumento $<1,0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ a pesar de un aumento en velocidad o producción de potencia; (2) un valor de tasa de intercambio respiratorio $>1,1$; (3) $HR \pm 5\%$ de la HR_{max} estimada para la edad; y (4) una concentración de lactato sanguíneo máxima (LA_{max}) $>6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ después del ejercicio. El análisis de confiabilidad de la prueba de VO_{2max} ($n = 18$) reveló valores de ICC de 0,96 para el VO_{2max} y 0,98 para el tiempo hasta el agotamiento (TTE).

Análisis Estadísticos

Todos los datos presentaron una distribución de Gaussiana verificada por la prueba de Shapiro-Wilk y por lo tanto los valores se presentan en forma de Media \pm SD. Para evaluar las diferencias globales entre las mediciones pre y post intervención, los cuatro grupos de entrenamiento y los efectos de interacción entre ambos factores se utilizó un ANOVA de dos vías de 2×4 (2 tiempos: pre vs post, 4 grupos). En los casos en los que se observó un efecto principal significativo a lo largo del tiempo, se utilizó el test *t* de muestras apareadas dentro de cada grupo. Debido a la diferencia en las unidades de potencia/velocidad máxima y potencia/velocidad en las concentraciones sanguíneas de lactato de 2 y $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ en el test incremental y en el test de VO_{2max} , se realizó el cálculo de los cambios porcentuales entre los valores pre y post, y se realizó un ANOVA de una vía entre los grupos y el test *pos hoc* de Tukey. Además, los cambios de estas variables dentro de los grupos fueron analizados mediante el test de Wilcoxon. Un valor del alfa de $<0,05$ fue considerado significativo. Para efectuar los análisis estadísticos se utilizó el software *Statistical Package for the Social Sciences (Versión 20,0; SPSS Inc., Chicago, IL, EE.UU.)* y *Excel de Office 2010 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, EE.UU.)*.

RESULTADOS

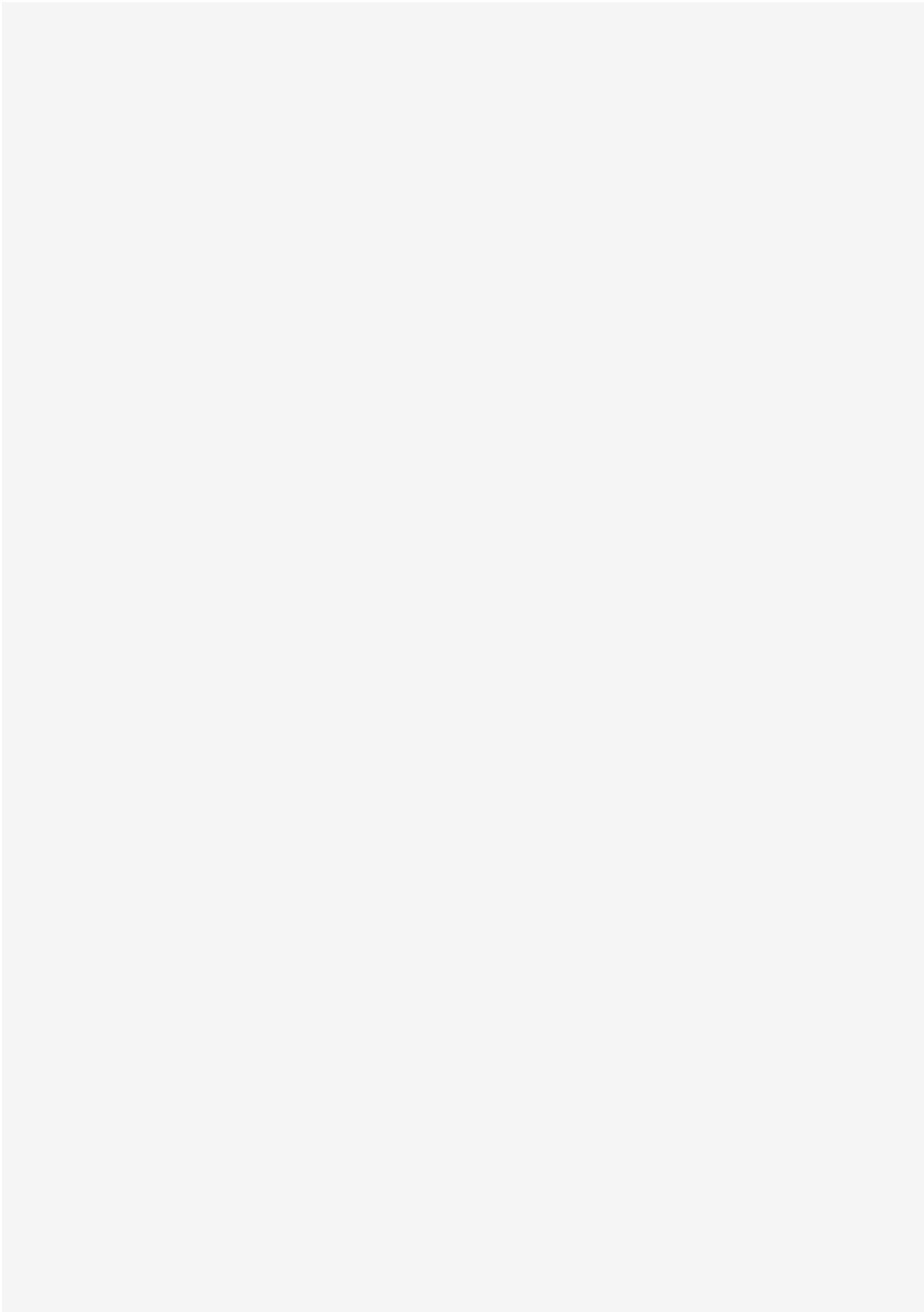
Cuarenta y un participantes completaron el protocolo de entrenamiento de 9 semanas, cumplieron más de 95% del programa de entrenamiento y se mantuvieron dentro de las zonas de HR dadas. Siete sujetos (2 en la HIIT, 1 en HVT y 4 en THR) abandonaron el estudio debido a enfermedad ($n = 2$), o fueron excluidos debido a cambios en el horario de competencias ($n = 3$) o por no cumplir el protocolo de entrenamiento ($n = 2$). Las horas de entrenamiento totales, número de sesiones de entrenamiento y su distribución porcentual dentro de BAJA, LTP y HIIT se presentan en la Tabla 1. POL y HVT tenían el mayor volumen de entrenamiento en comparación con THR y HIIT ($P < 0,05-0,001$), pero tenían un número similar de sesiones de entrenamiento ($P > 0,05$). HVT presentó la mayor cantidad de LOW (baja intensidad), THR de LT y HIIT en las sesiones de entrenamiento HIGH (intensidad alta) (todos, $P < 0,05$).

	POL	HIIT	THR	HVT	Valor de F	Valor P
Cantidad Total de Horas	104±20‡§	66±1*	84±7*	102±11‡§	*F _(3,37) =20	<0,001
Número de sesiones	54±3	47 ±1	49 ±3	58 ±3	*F _(3,37) = 1,6	n.s.
Cantidad de entrenamiento de baja intensidad (%)	37±9 (68±12%)*	20±1 (43±1%)+§	23±6 (46±7%)+§	49±7 (83±6%)*	*F _(3,37) =41	<0,001
Cantidad de entrenamiento en el umbral del lactato (%)	3±4 (6±8%)*	0 (0%)*	26±2 (54±7%)*	9±3 (16±6%)*	*F _(3,37) = 197	<0,001
Cantidad de entrenamiento en alta intensidad (%)	14±3 (26±7%)*	27 ±1 (57±1%)*	0 (0%)+‡	1±1 (1±1%)+‡	*F _(3,37) =769	<0,001

Tabla 1. Distribución del volumen y la intensidad del entrenamiento en las 9 semanas de la intervención de entrenamiento (se excluyó el entrenamiento de la fuerza). Los valores se presentan en forma de Media±SD. Los valores de F y P se obtuvieron mediante un ANOVA de una vía (4 grupos de entrenamiento). POL= Grupo que realizó entrenamiento polarizado; HIIT= Grupo que realizó entrenamiento intervalado de alta intensidad; THR= Grupo que realizó entrenamiento en el umbral del lactato; HVT= Grupo que realizó entrenamiento de alto volumen. * Presenta diferencias con todos los otros grupos. †Presenta diferencias con el grupo de entrenamiento POL. ‡ Presenta diferencias con el grupo de entrenamiento HIIT. § Presenta diferencias con el grupo de entrenamiento THR. § Presenta diferencias con el grupo de entrenamiento HVT. a Efecto principal entre los grupos. n.s= No significativo.

La masa corporal después del HIIT se redujo un 3,7±3,0% (Inicio del estudio: 73,5±6,8 kg, post.: 70,7±6,5 kg, P <0,01) pero no se observaron cambios significativos en los grupos HVT, THR o POL. La reducción en la masa corporal después de HIIT fue mayor en comparación con otras intervenciones de entrenamiento (P<0,001).

Los cambios porcentuales en las variables entre las determinaciones pre y post entrenamiento y entre los conceptos de entrenamiento durante los test incrementales de VO_{2max}, de economía de trabajo y test incrementales se presentan en la Tabla 2. El grupo POL presentó el mayor aumento en VO_{2max} de 11,7±8,4%, (60,6±8,3-67,4±7,7 ml·min⁻¹·kg⁻¹; P <0,001), seguido por el grupo HIIT con un aumento de 4,8±5,6% (P<0,05). El cambio en VO_{2max} en POL fue superior en comparación a THR y HVT (P<0,001 y P<0,05). El VO_{2max} absoluto aumentó 10,4±7,9% (P <0,001) en POL, y fue mayor a lo observado en los otros conceptos de entrenamiento (HIIT y HVT P<0,05, THR P<0,001). No se observaron cambios pre vs post y tampoco se observaron diferencias significativas entre los grupos de entrenamiento con respecto a HR_{max}, LA_{max} y HR₂ y 4 (P>0,05). La economía de trabajo aumentó después de HIIT (-6,7±4,4% de disminución en HR, P<0,01) y de THR (-2,7±1,0% de disminución en HR, P<0,05) y no se observaron diferencias significativas entre los otros conceptos. La economía de trabajo expresada en forma de porcentaje de VO_{2max} sólo aumentó después de POL (-4,8±7,6%, P <0,05) y no se observaron diferencias significativas entre los otros grupos de entrenamiento.



		POL		HIIT		THR		HVT		Valor de F	P-Valor
		Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post		
Test VO ₂ max	VO ₂ max (L min ⁻¹ Kg ⁻¹)	60,6 ±8,3	67,4±7,7 ^{***}	63,7±7,1	66,6 ±5,8*	63,2±4,6	60,8±7,1	60,5 ±9,4	62,1±9,8	F _(1,37) =13,6 ^a	<0,001
		11,7 ±8,4%		4,8 ±5,6%		-4,1±6,7%††††		2,6±45%†		F _(3,37) =0,5 ^b	NS
										F _(3,37) =11,9 ^c	<0,001
	VO ₂ max [L·min ⁻¹]	4,4 ±1,0	4,9±1,1 ^{**}	4,6 ±0,5	4,7±4,9	4,4 ±0,8	4,3 ±9,2	4,8 ±0,7	4,9±0,7	F _(1,37) =6,4 ^a	< 0,05
		10,4 ±7,9%		1,1±7,6 %*		-		3,7±7,0 %†††		F _(3,37) =0,6 ^b	NS
										F _(3,37) =8,0 ^c	<0,001
	HR _{max} [lpm]	187±7	186±7	185±9	182±11	180±10	179±9	183±4	183±4	F _(1,37) =1,9 ^a	NS
		-		1,3±2,3 %		-		0,3±1,9 %		F _(3,37) =1,4 ^b	NS
										F _(3,37) =1,0 ^c	NS
	LA _{max} [mmol·L ⁻¹]	10,2 ±1,7	10,7±1,7	9,6±1,7	10,2±1,7	9,5±1,6	9,9±2,2	10,1 ±1,7	9,9±2,0	F _(1,37) =1,7 ^a	NS
		7,5 ±20,4%		6,4 ±8,3%		5,3±19,1 %		1,0±11,8 %		F _(3,37) =0,4 ^b	NS
										F _(3,37) =0,4 ^c	NS
Economía de Trabajo	VO ₂ sub max [mL·min ⁻¹ ·kg ⁻¹]	38,2 ±5,5	39,7±5,0	34,8±6,1	35,9±6,2	34,7±5,1	33,7±4,4	35,2 ±4,4	35,3±4,7	F _(1,37) =0,5 ^a	NS
		4,6 ±10,5%		3,8 ±12,0%		-		-2,1±7,8		F _(3,37) =2,0 ^b	NS
										F _(3,37) =1,0 ^c	NS
	VO ₂ sub max [%VO ₂ max]	62,4 ±12,3	59,0 ±9,8*	54,8±5,0	53,2±5,3	54,9±7,9	56,0±8,1	58,9 ±8,6	57,7±9,6	F _(1,37) =2,3 ^a	NS
		-4,8 ±7,6%		2,5±10,5 %		-		2,1±7,0 %		F _(3,37) =1,3 ^b	NS
										F _(3,37) =1,4 ^c	NS
	HR _{sub} max [lpm]	136±10	135±13	141±13	131±6**	143 ±3	139±3*	136±7	134±5	F _(1,37) =11,7 ^a	<0,01
		-		6,7±4,4 %		-		-2,7±1,0		F _(3,37) =0,4 ^b	NS
										F _(3,37) =1,7 ^c	NS
	HR _{sub} max [%HR _{max}]	74,3 ±5,4	72,5±6,3	76,1±4,7	71,9±2,2*	77,8±3,6	75,8±3,9**	74,2 ±2,1	73,0±1,6	F _(1,37) =9,3 ^a	<0,01
		-2,4 ±6,3%		-5,4 ±4,5%		-		-2,6±0,9		F _(3,37) =0,7 ^b	NS
										F _(3,37) =1,0 ^c	NS
Test Incremental	HR2 [lpm]	139±9	136±13	138±10	141±9	152±12	151±9	138±19	138±18	F _(1,37) =0,1 ^a	NS
		-		2,2±5,9 %		-		-0,3±6,5		F _(3,37) =3,7 ^b	<0,05
										F _(3,37) =0,5 ^c	NS
	HR4 [lpm]	157±14	157±13	163±12	162±11	171±9	169±9	160±12	162±12	F _(1,37) =0,2 ^a	NS
		-		-0,3±3,8%		-		-1,2±3,8		F _(3,37) =2,6 ^b	NS
										F _(3,37) =0,5 ^c	NS
	HR _{max} [lpm]	186±6	184±5*	191±10	191±10	187±9	184±9	187±7	184±4	F _(1,37) =5,5 ^a	<0,05
		-		-0,02±2,3%		-		-1,4±2,9%		F _(3,37) =1,2 ^b	NS
										F _(3,37) =0,6 ^c	NS
	LA _{max} [mmol·L ⁻¹]	10,6 ±1,5	11,1±1,6	11,1±1,8	11,9±2,3	9,9±1,8	10,2±2,5	10,8 ±1,4	9,8±1,3	F _(1,37) =0,2 ^a	NS
		4,7±13,4 %		7,7±21,1 %		4,0±20,0 %		-7,2±21,0%		F _(3,37) =1,6 ^b	NS
										F _(3,37) =1,1 ^c	NS

Tabla 2. Cambios en las variables fisiológicas entre las mediciones efectuadas antes (Pre) y después (Post) del entrenamiento. Los valores se presentan en forma de Media±SD. Los valores de F y P se obtuvieron mediante un ANOVA de dos vías (2x4: tiempo x grupo de entrenamiento). POL= Grupo que realizó entrenamiento polarizado; HIIT= Grupo que realizó entrenamiento intervalado de alta intensidad; THR= Grupo que realizó entrenamiento en el umbral del lactato; HVT= Grupo que realizó entrenamiento de alto volumen. VO₂=Consumo de oxígeno; HR=Frecuencia cardíaca; LA_{max}=Concentración de lactato sanguíneo máxima; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,0010 nivel de significancia estadística entre los valores pre y post entrenamiento. †p<0,05; ††p<0,001 = Niveles de significancia estadística en referencia a las diferencias con el grupo POL. ‡p<0,05 se observan diferencias significativas con el grupo HIIT. a Efecto principal entre las mediciones Pre y Post entrenamiento. b Efecto principal entre los grupos de entrenamiento. c Efecto de interacción tiempo x grupo de entrenamiento.

Los cambios en TTE, V/Pmax y V/P₂ y₄ pre vs post entrenamiento y entre los grupos de entrenamiento solos se presentan en la Tabla 3. El mayor porcentaje de incremento en TTE, evaluado con el test incremental de VO_{2max}, se observó en respuesta a POL (±17,4%, P <0,001) seguido por HIIT (±8,8%, P <0,01); sin embargo, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los cuatro conceptos de entrenamiento. V/Pmax en el test incremental aumentó en respuesta a POL y HIIT (5,1±3,0% y 4,4±2,8%, ambos P <0,01) y ambos grupos presentaron cambios mayores a los de HVT (P<0,01 y P<0,05). V/P₄ aumentó después de POL (8,1±4,6%, P <0,01) y HIIT (5,6±4,8%, P <0,01) y los cambios fueron mayores después de POL en comparación con los cambios observados después de THR y HVT (ambos P<0,05).

	POL	HIIT	THR	HVT	Valor de F	P-Valor
TTE	17,4±16,1***	8,8±8,6**	6,2±9,0	8,0±10,3	*F _(3, 37) = 2,0	NS
V/P ₂	9,3±12,4	12,1 ±8,8**	2,0±13,8	0,8±13,3	*F _(3,37) = 1,9	NS
V/P ₄	8,1±4,6**	5,6±4,8*	1,4±4,3†	1,2±6,6†	*F _(3, 37) = 4,5	<0,01
V/P _{max}	5,1±3,0**	4,4±2,8**	1,8±4,8	-1,5±4,9††*	*F _(3, 37) = 4,6	<0,01

Tabla 3. Cambios porcentuales en velocidad (V) y potencia (P) en diferentes umbrales de lactato así como también en la velocidad y potencia máximas. Los valores se presentan en forma de Media±SD. Los valores de F y P se obtuvieron mediante un ANOVA de una vía (4 grupos de entrenamiento) calculado en función de la diferencia porcentual entre las determinaciones Pre y Post entrenamiento. POL= Grupo que realizó entrenamiento polarizado; HIIT= Grupo que realizó entrenamiento intervalado de alta intensidad; THR= Grupo que realizó entrenamiento en el umbral del lactato; HVT= Grupo que realizó entrenamiento de alto volumen. TTE= Tiempo hasta el agotamiento durante el protocolo incremental; V/P₂= Velocidad o potencia en 2 mmol·L⁻¹; V/P₄= Velocidad o potencia en 4 mmol·L⁻¹; V/P_{max}= Velocidad o potencia máxima durante el test incremental; *p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001 se observan diferencias significativas entre los grupos en las determinaciones Pre y Post entrenamiento. †p < 0,05; ††p<0,01 se observan diferencias significativas con el grupo de entrenamiento POL. a Efecto principal entre los grupos.

DISCUSIÓN

El propósito del estudio fue determinar si HIIT, HVT, THR, o POL tenían un gran impacto en las variables fundamentales para el rendimiento de resistencia en atletas altamente entrenados. Los resultados principales fueron que (1) POL produjo la mayor mejora en VO_{2max}, TTE y V/Pmax; (2) V/P₄ aumentó después de POL y HIIT; (3) no se observaron diferencias significativas en la economía de trabajo entre las determinaciones pre y post entre ninguno de los grupos; y finalmente (4) la masa corporal disminuyó 3,7% en respuesta a HIIT.

Hay varios desafíos asociados con implementar una intervención de entrenamiento físico como la que presentamos aquí. En primer lugar, el cumplimiento de todos los atletas es fundamental para la realización exitosa del estudio y para el análisis posterior de la intervención. Los atletas asistieron a más del 95% de todas las sesiones de entrenamiento y todos completaron sus cargas de entrenamientos predeterminadas (intensidad basada en las zonas de HR, duración, y frecuencia) lo que fue confirmado por el registro de los datos de dosis de entrenamiento diarias en un diario y el análisis del retrospectivo de los datos de HR. En segundo lugar, es difícil realizar un estudio experimental con atletas de élite porque, ni a los atletas ni a sus entrenadores les gusta alterar la intensidad, duración o frecuencia del entrenamiento de los atletas. Sin embargo, logramos realizar con éxito el estudio actual en atletas varones y mujeres altamente entrenados (VO_{2max}: 52-75 mL·min⁻¹·kg⁻¹) durante un período de 9 semanas.

De los cuatro conceptos de entrenamiento, POL provocó el mayor aumento en VO_{2max} , TTE, V/P_{max} y, junto con HIIT, en V/P₄. Tal como mencionamos, POL fue confirmado por el análisis retrospectivo de la intensidad, duración y distribución de frecuencia de la carga de entrenamiento en los atletas altamente entrenados (Steinacker et al., 1998; Billat et al, 2001; Schumacher y Mueller, 2002; Seiler y Kjerland, 2006; Esteve-Lanao et al, 2007). En estos estudios, se demostró que los atletas de resistencia realizan aproximadamente 75% de su entrenamiento anual por debajo o muy por encima del umbral de lactato (LT) (~15-20%), y una pequeña cantidad en el umbral del lactato. En el estudio actual, POL imitó esta distribución (BAJO = 68%, LTP = 6%, ALTO = 26%). Sólo el estudio de Neal et al. (2013) observó que 6 semanas de POL produjeron una adaptación sistémica mayor en los ciclistas entrenados en comparación con THR, lo que coincide con nuestros resultados.

En las personas ligeramente entrenadas, el entrenamiento de alto volumen (HVT) mejora las adaptaciones metabólicas y hemodinámicas durante 3 días (Green et al, 1987, 1990; Coyle, 1999). Sin embargo, para mejorar el VO_{2max} es necesario un volumen mayor de entrenamiento (~3-5 semanas con 3-5 sesiones/semana) (Laursen y Jenkins, 2002). Una razón por la cual los atletas pueden elegir realizar una gran cantidad de HVT se deba quizás a que el HVT produce una mejor utilización de grasa y de glucosa (Romijn et al, 1993) lo que es beneficioso para los eventos de resistencia de larga duración. Por consiguiente, podría ser razonable incluir HVT en el programa entrenamiento de atletas de resistencia de élite para mejorar el flujo oxidativo que es importante para convertir la energía aeróbicamente y para la recuperación después y durante las sesiones de HIIT con gran contribución anaeróbica. Cuando el HVT se transforma en el componente mayor de un programa de entrenamiento y se abandonan las sesiones de HIIT, no se produce ninguna mejora adicional en VO_{2max} y en el rendimiento de atletas que ya están altamente entrenados (Costill et al, 1988; Laursen y Jenkins, 2002); algo que coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio. Las mejoras adicionales de atletas altamente entrenados requieren agregar sesiones de entrenamiento de alta intensidad al HVT, tal como se demostró en POL. Sin embargo, debido a que los participantes de este estudio utilizaban principalmente HVT antes de este estudio, el modelo HVT podría no haber mantenido un estímulo adecuado para adaptaciones adicionales.

La ventaja de HIIT en comparación con HVT reside en que se necesita un período más corto de tiempo de entrenamiento para alcanzar adaptaciones musculares similares (Gibala et al, 2006; Burgomaster et al, 2008). En respuesta al HIIT, se han informado varias adaptaciones centrales y periféricas entre las que se incluyen un mayor volumen sistólico (Helgerud et al, 2007) y volumen de sangre (Shepley et al, 1992), mayor extracción de O₂ (Daussin et al, 2007), y mejoras en el metabolismo aeróbico y anaeróbico (Macdougall et al, 1998), así como también una mayor biogénesis mitocondrial y capacidad oxidativa (Gibala et al, 2006; Daussin et al, 2007, 2008; Burgomaster et al, 2008). Las adaptaciones mencionadas en respuesta al HIIT explican los aumentos frecuentemente documentados en TTE, en el rendimiento en pruebas contrarreloj (Lindsay et al, 1996), umbral del lactato y umbral ventilatorio (Acevedo y Goldfarb, 1989; Edge et al, 2005) y VO_{2max} (Laursen y Jenkins, 2002; Gibala et al, 2006; Midgley et al, 2006; Daussin et al, 2007, 2008; Burgomaster et al, 2008).

El presente estudio, así como el de Helgerud et al. (2007), demostraron que el entrenamiento cerca o en el VO_{2max} puede ser más eficaz para aumentar el VO_{2max} cuando se compara con HVT o THR. Sin embargo, POL, una combinación de HVT y HIIT, sería superior para aumentar el VO_{2max} y el rendimiento. Numerosos estudios que utilizaron HIIT "bloqueado" o "condensado" (es decir, varias sesiones de HIIT en 1 o 2 semanas) buscaban aumentar el VO_{2max} (Robado et al., 2005). Además, en estudios de intervención con HIIT (2-3 sesiones de HIIT por semana), el VO_{2max} aumentó aproximadamente 9% durante una intervención de entrenamiento de 10 semanas (McMillan et al, 2005) y 11% durante una intervención de entrenamiento de 6 semanas (Helgerud et al, 2001) en jugadores de fútbol juveniles y menores, lo que sugiere un aumento de 0,5% en VO_{2max} por sesión de entrenamiento HIIT. En el estudio actual, el aumento en VO_{2max} luego de 9 semanas de HIIT (27 sesiones de HIIT) fue 4,8% (0,18% de aumento por sesión de entrenamiento), mientras que POL produjo un aumento de 11,7% en VO_{2max} con menos sesiones de HIIT (14 sesiones de HIIT) (0,84% aumento por sesión de entrenamiento). Este resultado puede ser explicado por: (1) la adaptación máxima se habría alcanzado luego del primer bloque de HIIT y por consiguiente, series repetidas de HIIT no produjeron mejoras adicionales en VO_{2max} o el rendimiento o (2) la combinación de HVT y HIIT, como en POL, produce mayores adaptaciones a largo plazo en el rendimiento de resistencia que las que se producen con HIIT o HVT exclusivamente.

El THR mejora el VO_{2max} , los umbrales de lactato y ventilatorio y el rendimiento de resistencia en personas desentrenadas (Denis et al., 1984; Londeree, 1997; Gaskill et al, 2001). Estos resultados no coinciden con los obtenidos en este estudio, porque nosotros no observamos mejoras en VO_{2max} , V/P₄, TTE o V/P_{max} en nuestros atletas de élite en respuesta a THR. Adicionalmente, es posible que en los atletas de resistencia altamente entrenados, las series repetidas de entrenamiento en el LT pudieran generar estrés simpático injustificado (Chwalbinska-Moneta et al, 1998), y no ofrecer ningún estímulo adicional para la mejora del rendimiento (Londeree, 1997). En este contexto, sobre todo dentro del grupo de THR, se observó una variabilidad significativa en los cambios individuales en el VO_{2max} entre las mediciones pre y post intervención (valores que variaron de -20 a +4%). Sin embargo, algunos entrenamientos THR podrían ser beneficiosos para los atletas altamente entrenados ya que los esquiadores de esprint de fondo de clase mundial presentaron un volumen de

entrenamiento mayor en las zonas de intensidad bajas y moderadas en comparación con los esquiadores de nivel nacional (Sandbakk et al, 2011).

La masa corporal de los atletas altamente entrenados disminuyó 3,7% (aproximadamente 3 kg) después de HIIT, pero no en respuesta a los otros conceptos de entrenamiento. El HIIT favorece la oxidación de los lípidos y promueve la pérdida de tejido adiposo (Perry et al, 2008; Boutcher, 2011). Dependiendo del valor del atleta obtenido al inicio, la reducción en la masa corporal puede impactar negativamente la función inmune y la salud global, y también inducir un estado catabólico. Los bloques de entrenamiento con mayor volumen y/o intensidad de ejercicio podrían inducir síntomas de "sobreenentrenamiento a corto plazo", una capacidad física reducida, síntomas de *burnout* entre los que se incluye el cansancio y la falta de energía (Angeli et al, 2004). Sin embargo, a pesar de las grandes diferencias en las respuestas individuales en algunos de los grupos de entrenamiento, ninguno de los atletas presentó menor tiempo hasta el agotamiento (TTE) o menor V/P_{max} después del estudio, y tampoco informaron alguno de los síntomas mencionados durante y después de las 9 semanas de intervención. Sobre la base de los cambios observados en la masa corporal y los menores aumentos en VO_{2max} el grupo de HIIT en comparación con datos publicados previamente (McMillan et al, 2005; Stølen et al., 2005; Helgerud et al, 2007), bloques más largos de períodos de entrenamiento con intensidades altas podrían provocar estos síntomas.

Salvo por las disminuciones significativas en el % VO_{2max} en el grupo POL y HR_{submax}/HR_{max} en los grupos HIIT y THR (sin diferencias en los grupos), no se observaron mejoras en la economía de trabajo en el estudio actual. Helgerud et al. (2007) informaron una mejora de ~5% en la economía de carrera después de THR, HIIT, y HVT y no observaron diferencias entre los grupos. Estas mejoras fueron atribuidas principalmente a una mayor cantidad de entrenamiento de carrera. Por consiguiente, los regímenes de entrenamiento aplicados fueron ampliamente responsables de los cambios en V/P_{max} y VO_{2max}, mientras que la economía de trabajo se mantuvo bastante constante. Solo se observó mejoras en V/P₄ sólo en los grupos POL (8,1%) y HIIT (5,6%). Esto es consistente con resultados que demuestran que la velocidad de carrera en el umbral del lactato sigue a las mejoras en el VO_{2max} (Helgerud et al, 2001; McMillan et al, 2005).

Limitaciones y Perspectivas

Para evaluar los efectos de las cuatro intervenciones de entrenamiento de resistencia sobre las variables claves para el rendimiento de resistencia se utilizó metodología estandarizada de diagnósticos de rendimiento (test incremental y protocolo de incrementos de VO_{2max}). Sin embargo, para los futuros estudios es necesario establecer una transferencia directa a situaciones específicas de competición (por ejemplo, pruebas contrarreloj). Además, el aumento de aproximadamente 11% en VO_{2max} con el entrenamiento POL dentro de las 9 semanas es grande para los sujetos altamente entrenados en resistencia y tiene que ser puesto en perspectiva dentro de la periodización de entrenamiento anual. Es necesario realizar estudios de entrenamiento a largo plazo para evaluar estos aspectos.

Conclusión

En este estudio de atletas de élite que realizaron entrenamiento HIIT, HVT, THR o POL, el grupo que realizó POL obtuvo las mayores mejoras en las variables importantes para el rendimiento de resistencia (VO_{2max}, TTE, V/P_{max} y V/P₄). El entrenamiento HIIT provocó una disminución en la masa corporal y aumentos menos pronunciados en VO_{2max} en comparación con resultados de estudios anteriores en los que se utilizó HIIT de corta duración (1-2 semanas), lo que sugiere que una intervención de 9 semanas de HIIT debe ser aplicada con cuidado. Los entrenamientos exclusivos con THR o HVT no produjeron mejoras adicionales en las variables asociadas al rendimiento de resistencia en los atletas altamente entrenados.

Declaración sobre Financiamiento

Para la realización de este trabajo no se recibió ningún financiamiento de los Institutos Nacionales de Salud, ni de los institutos *Welcome Trust* o Instituto Médico *Howard Hughes* ni de otras agencias de agencias PubMed Central. Ninguno de los autores tiene relación profesional con compañías o fabricantes que pudieran beneficiarse de los resultados del estudio presente. Los autores declaran no poseer ningún conflicto de interés.

Contribución de los Autores

Concepción y diseño de los experimentos: Thomas Stöggl, Billy Sperlich. Realización de experimentos: Thomas Stöggl. Análisis de los datos: Thomas Stöggl, Billy Sperlich. Preparación del manuscrito: Thomas Stöggl y Billy Sperlich. Ambos autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los atletas, entrenadores y ayudantes de investigación que participaron en este estudio por

su participación, entusiasmo y cooperación. A los autores les gustaría expresar el agradecimiento por su ayuda a Donna Kennedy. Especial gracias a Julia Stöggel, Andreas Hochwimmer y Thomas Damisch por su gran ayuda en el reclutamiento, cuidado y control de los atletas durante la intervención de entrenamiento y las evaluaciones efectuadas pre y post intervención.

REFERENCIAS

1. Acevedo, E. O., and Goldfarb, A. H. (1989). Increased training intensity effects on plasma lactate, ventilatory threshold, and endurance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 21, 563-568. doi: 10.1249/00005768-198910000-00011
2. Angeli, A., Minetto, M., Dovio, A., and Paccotti, P. (2004). The overtraining syndrome in athletes: a stress-related disorder. */ Endocrinol. Invest* 27, 603-612.
3. Bassett, D. R. Jr., and Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32, 70-84. doi: 10.1097/00005768-200001000-00012
4. Billat, V. L., Demarle, A., Slawinski, J., Paiva, M., and Koralsztein, J. P. (2001). Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33, 2089-2097. doi: 10.1097/00005768-200112000-00018
5. Boutcher, S. H. (2011). High-intensity intermittent exercise and fat loss. */ Obes.* 2011, 868305. doi: 10.1155/2011/868305
6. Burgomaster, K. A., Howarth, K. R., Phillips, S. M., Rakobowchuk, M., Macdonald, M. J., McGee, S. L., et al. (2008). Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. */ Physiol* 586, 151-160. doi: 10.1113/jphysiol.2007.142109
7. Chwalbinska-Moneta, J., Kaciuba-Uscilko, H., Krzysztofik, H., Ziemia, A., Krzeminski, K., Kruk, B., et al. (1998). Relationship between EMG, blood lactate, and plasma catecholamine thresholds during graded exercise in men. */ Physiol. Pharmacol.* 49, 433-441.
8. Costill, D. L., Flynn, M. G., Kirwan, J. P., Houmard, J. A., Mitchell, J. B., Thomas, R., et al. (1988). Effects of repeated days of intensified training on muscle glycogen and swimming performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 20, 249-254. doi: 10.1249/00005768-198806000-00006
9. Coyle, E. F. (1999). Physiological determinants of endurance exercise performance. */ Sci. Med. Sport!*, 181-189. doi: 10.1016/S1440-2440(99)80172-8
10. Daussin, F. N., Ponsot, E., Dufour, S. P., Lonsdorfer-Wolf, E., Doutreleau, S., Geny, B., et al. (2007). Improvement of V_{O2}max by cardiac output and oxygen extraction adaptation during intermittent versus continuous endurance training. *Eur. f. Appl. Physiol.* 101, 377-383. doi: 10.1007/s00421-007-0499-3
11. Daussin, F. N., Zoll, J., Ponsot, E., Dufour, S. P., Doutreleau, S., Lonsdorfer, E., et al. (2008). Training at high exercise intensity promotes qualitative adaptations of mitochondrial function in human skeletal muscle. */ Appl. Physiol.* 104, 1436-1441. doi: 10.1152/jappphysiol.01135.2007
12. Denis, C., Dormois, D., and Lacour, J. R. (1984). Endurance training, V_{O2} max, and OBLA: a longitudinal study of two different age groups. *Int. J. Sports Med.* 5, 167-173. doi: 10.1055/s-2008-1025899
13. Di Prampero, P. E., Atchou, G., Bruckner, J. C., and Moia, C. (1986). The energetics of endurance running. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 55, 259-266. doi: 10.1007/BF02343797
14. Edge, J., Bishop, D., Goodman, C., and Dawson, B. (2005). Effects of high- and moderate-intensity training on metabolism and repeated sprints. *Med. Sci. Sports Exerc.* 37, 1975-1982. doi: 10.1249/01.mss.0000175855.35403.4c
15. Esteve-Lanao, J., Foster, C., Seiler, S., and Lucia, A. (2007). Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes. */ Strength Cond. Res.* 21, 943-949. doi: 10.1519/00124278-200708000-00048
16. Esteve-Lanao, J., San Juan, A. E., Earnest, C. P., Foster, C., and Lucia, A. (2005). How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 37, 496-504. doi: 10.1249/01.MSS.0000155393.78744.86
17. Evertsen, E., Medbo, J. I., and Bonen, A. (2001). Effect of training intensity on muscle lactate transporters and lactate threshold of cross-country skiers. *Acta Physiol. Scand.* 173, 195-205. doi: 10.1046/j.1365-201X.2001.00871.x
18. Faude, O., Kindermann, W., and Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts: how valid are they? *Sports Med.* 39, 469-490. doi: 10.2165/00007256-200939060-00003
19. Gaskell, S. E., Walker, A. J., Serfass, R. A., Bouchard, C., Gagnon, J., Rao, D. C., et al. (2001). Changes in ventilatory threshold with exercise training in a sedentary population: the HERITAGE family study. *Int. J. Sports Med.* 22, 586-592. doi: 10.1055/S-2001-18522
20. Gibala, M. J., Little, J. P., van Essen, M., Wilkin, G. P., Burgomaster, K. A., Safdar, A., et al. (2006). Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. */ Physiol.* 575, 901-911. doi: 10.1113/jphysiol.2006.112094
21. Green, H. J., Jones, L. L., Hughson, R. L., Painter, D. C., and Farrant, B. W. (1987). Training-induced hypervolemia: lack of an effect on oxygen utilization during exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 19, 202-206. doi: 10.1249/00005768-198706000-00003
22. Green, H. J., Jones, L. L., and Painter, D. C. (1990). Effects of short-term training on cardiac function during prolonged exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 22, 488-493. doi: 10.1249/00005768-199008000-00012
23. Guellich, A., and Seiler, S. (2010). Lactate profile changes in relation to training characteristics in junior elite cyclists. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 5, 316-327.
24. Helgerud, J., Engen, L. C., Wisloff, U., and Hoff, J. (2001). Aerobic endurance training improves soccer performance. *Med. Sci.*

- Sports Exerc.* 33, 1925-1931. doi: 10.1097/00005768-200111000-00019
25. Helgerud, J., Hoydal, K., Wang, E., Karlsen, T., Berg, P., Bjerkaas, M., et al. (2007). Aerobic high-intensity intervals improve V_O2max more than moderate training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 39, 665-671. doi: 10.1249/mss.0b013e3180304570
 26. Laursen, P. B., and Jenkins, D. G. (2002). The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med.* 32, 53-73. doi: 10.2165/00007256-200232010-00003
 27. Lindsay, F. H., Hawley, J. A., Myburgh, K. H., Schomer, H. H., Noakes, T. D., and Dennis, S. C. (1996). Improved athletic performance in highly trained cyclists after interval training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28, 1427-1434. doi: 10.1097/00005768-199611000-00013
 28. Londeree, B. R. (1997). Effect of training on 1 act ate/ventilator y thresholds: ameta-analysis. *Med Sci. SportsExerc.* 29, 837-843. doi: 10.1097/00005768-199706000-00016
 29. Macdougall, J. D., Hicks, A. L., Macdonald, J. R., McKelvie, R. S., Green, H. J., and Smith, K. M. (1998). Muscle performance and enzymatic adaptations to sprint interval training. *J. Appl. Physiol.* 84, 2138-2142.
 30. McMillan, K., Helgerud, J., Grant, S. J., Newell, J., Wilson, J., Macdonald, R., et al. (2005). Lactate threshold responses to a season of professional British youth soccer. *Br. f. Sports Med.* 39, 432-436. doi: 10.1136/bjsm.2004.012260
 31. Midgley, A. W., McNaughton, L. R., and Jones, A. M. (2007). Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance: can valid recommendations be given to runners and coaches based on current scientific knowledge? *Sports Med.* 37, 857-880. doi: 10.2165/00007256-200737100-00003
 32. Midgley, A. W., McNaughton, L. R., and 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. doi: 10.2165/00007256-200636020-00003
 33. Neal, C. M., Hunter, A. M., Brennan, L., O'Sullivan, A., Hamilton, D. L., De Vito, G., et al. (2013). Six weeks of a polarized training-intensity distribution leads to greater physiological and performance adaptations than a threshold model in trained cyclists. *J. Appl. Physiol.* 114, 461-471. doi: 10.1152/jappphysiol.00652.2012
 34. Perry, C. G., Heigenhauser, G. J., Bonen, A., and Spriet, L. L. (2008). High-intensity aerobic interval training increases fat and carbohydrate metabolic capacities in human skeletal muscle. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 33, 1112-1123. doi: 10.1139/H08-097
 35. Romijn, J. A., Coyle, E. E., Sidossis, L. S., Gastaldelli, A., Horowitz, J. E., Endert, E., et al. (1993). Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *Am. J. Physiol.* 265, E380-E391.
 36. Sandbakk, O., Holmberg, H. C., Leirdal, S., and Ettema, G. (2011). The physiology of world-class sprint skiers. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 21, e9-el6. doi: 10.1111/j.1600-0838.2010.01117.x
 37. Schumacher, Y. O., and Mueller, P. (2002). The 4000-m team pursuit cycling world record: theoretical and practical aspects. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34, 1029-1036. doi: 10.1097/00005768-200206000-00020
 38. Seiler, K. S., and Kjerland, G. O. (2006). Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an "optimal" distribution? *Scand. f. Med. Sci. Sports* 16, 49-56. doi: 10.1111/j.1600-0838.2004.00418.x
 39. Shepley, B., Macdougall, J. D., Cipriano, N., Sutton, J. R., Tarnopolsky, M. A., and Coates, G. (1992). Physiological effects of tapering in highly trained athletes. *J. Appl. Physiol.* 72, 706-711.
 40. Steinacker, J. M., Lormes, W., Lehmann, M., and Altenburg, D. (1998). Training of rowers before world championships. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30, 1158-1163. doi: 10.1097/00005768-199807000-00022
 41. Stolen, T., Chamari, K., Castagna, C., and Wisloff, U. (2005). Physiology of soccer: an update. *Sports Med* 35, 501-536. doi: 10.2165/00007256-200535060-00004

Cita Original

Thomas Stöggl, and Billy Sperlich. Polarized training has greater impact on key endurance variables than threshold, high intensity, or high volume training. *Frontiers in Physiology*; Volume 5, Article, 33, 2014.