

Economía de carrera y rendimiento. Esfuerzos de alta y baja intensidad en el entrenamiento y calentamiento. Revisión bibliográfica

Fernando González-Mohino Mayoralas¹, José F Jiménez Díaz², Daniel Juárez Santos-García¹, Rubén Barragán Castellanos¹, Inmaculada Yustres¹, José M^o González-Ravé¹

¹Laboratorio de Entrenamiento Deportivo. Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte de Toledo. UCLM. ²Laboratorio de Rendimiento y Rehabilitación Deportiva. Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte de Toledo. UCLM.

Recibido: 23.06.2017
Aceptado: 04.10.2017

Resumen

La economía de carrera ha crecido en importancia en la literatura científica como factor de rendimiento en corredores de fondo y medio fondo tanto de alto nivel como recreacional. Los atletas entrenados son más económicos que aquellos no entrenados, mostrando que es una variable que se mejora con el entrenamiento. Un factor clave en la selección del entrenamiento de resistencia es la intensidad del esfuerzo a realizar, principalmente caracterizado por dos métodos de entrenamientos como son el interválico y el continuo. En corredores de nivel recreacional, existe cierta controversia en relación a qué intensidades son las óptimas para mejorar la economía de carrera, recomendándose la realización de entrenamiento periodizado y exista una lógica relación entre entrenamiento de alta y baja intensidad. Recomendamos la inclusión de 2-3 sesiones semanales de entrenamiento interválico, compensado con entrenamiento continuo. En cuanto a los corredores entrenados de más nivel, el entrenamiento interválico cobra mayor importancia (intensidades cercanas al $VO_2\text{max}$) dado que la realización de esfuerzos de mayor intensidad provocará que sean más económicos a intensidades de competición. Intensidades de entrenamiento muy altas no conllevarán mejoras en la economía de carrera debido a que no es posible acumular suficiente volumen de entrenamiento. Por otro lado, los esfuerzos de alta intensidad previos a la competición (intensidades superiores al umbral anaeróbico), es decir, durante el calentamiento, aumentan el coste de energía (reducción de la economía de carrera) y, por lo tanto, se recomienda una amplia fase de transición entre tales esfuerzos y la competición (entre 9-20 min), para que el rendimiento no se vea perturbado. Se recomienda un aumento en el aporte científico en relación a los efectos de esfuerzos de alta intensidad durante el calentamiento, con el fin de conocer qué intensidades son más óptimas, el terreno a utilizar (llano o pendiente), o la recuperación necesaria para mejorar el rendimiento.

Palabras clave:
Entrenamiento de resistencia.
Coste de energía. Corredor.
Alta intensidad.

Running economy and performance. High and low intensity efforts during training and warm-up. A bibliographic review

Summary

Interest in relation to running economy has increased such as determinant of running performance in scientific literature in trained long and middle distance runners and recreational runners. Trained runners are more efficient than untrained runners, meaning it is a "trainable" parameter. A key factor during endurance training is the intensity of corresponding effort, characterized by two endurance training methods such as interval and continuous training. In recreational runners, there is some controversy about which intensities are optimal in order to improve running economy, thus, periodized endurance training with a logical relationship between high and low-intensity training is recommended. We recommend the inclusion of 2-3 session per week of interval training, compensated with continuous training. Regarding to trained runners, interval training (at intensities close to $VO_2\text{max}$) will be more important because of the need to be more economical at competitive intensities. Very high training intensities would not lead improvements in running economy due to it is not posible to accumulate enough training volumen during the training period. Conversely, the high-intensity efforts prior to competition (intensities above anaerobic threshold), during a warm-up protocol, increase the energy cost (reduce the running economy) and therefore, it is recommended a long transient phase (9-20 min) before to competition so as not to disturb the subsequent performance. An increase of scientific studies regarding the effects of high-intensity efforts during a warm-up protocol is needed in order to know the optimal intensities, flat or uphill ground, or the adequate recovery to improve the subsequent performance.

Key words:
Endurance training.
Energy cost. Runner.
High intensity.

Correspondencia: Fernando González-Mohino Mayoralas
E-mail: fernando.gmayoralas@uclm.es

Introducción

Los deportes de resistencia requieren la realización de un determinado esfuerzo durante un tiempo prolongado. En la literatura científica, ya en la década de 1920, Hill y Lupton¹ comenzaron a hablar sobre el Consumo de Oxígeno Máximo (VO_{2max}) y de su importancia en el rendimiento deportivo. Su visión ha sido aceptada a lo largo de los años y actualmente, se han ido añadiendo otros factores fisiológicos que pudieran influir en el rendimiento en los deportes de resistencia. Además del VO_{2max} , el umbral anaeróbico (UAN)^{2,3} y la economía de carrera (EC)^{4,5} han sido documentados y englobados como determinantes del rendimiento en deportes de resistencia, en especial en carreras de larga y media distancia⁶. Aunque el VO_{2max} si puede discriminar entre diferentes tipos de poblaciones y deportes, ésta no puede hacerlo igualmente entre corredores de alto nivel. Daniels⁷ se encontró con la tesitura de evaluar atletas con valores de VO_{2max} inferiores y que poseían marcas y rendimiento en competición mejores que atletas con VO_{2max} superiores. Esto se podría explicar mediante la variable de EC. Atletas con pobres valores de EC, tienden a tener altos valores de VO_{2max} (relación inversa), pudiéndose mejorar la EC y producirse un cambio negativo en VO_{2max} ^{8,9}. En atletas altamente entrenados, una pequeña-moderada relación se encontró entre EC y VO_{2max} ¹⁰. Mientras que variables como el VO_{2max} han sido ampliamente estudiadas como factor determinante en corredores, la EC ha sido ignorada hasta hace pocas décadas, y desde la década de 1970 ha ido creciendo su importancia en la literatura científica¹¹.

La EC es el resultado de una compleja interacción entre multitud de factores. Entre ellos podemos destacar variables biomecánicas¹², neuromusculares como la rigidez de la pierna, exposición a periodos de entrenamiento en altitud o variables antropométricas⁶. En esta revisión bibliográfica, explicaremos qué es la economía de carrera, sus formas de medición y nos centraremos en aquellos aspectos relacionados con el entrenamiento de resistencia mediante la utilización de dos métodos de entrenamiento: continuo e interválico, y por lo tanto de esfuerzos de alta y baja intensidad y su relación con la EC. Como esfuerzos de alta intensidad (método interválico) entenderemos aquellas intensidades por encima del umbral anaeróbico, es decir, por encima del 85-90% de $v_{O_{2max}}$ y de la FC máxima, y, por lo tanto, las de baja intensidad (método continuo), aquellas por debajo de estos límites. Finalmente, trataremos el efecto que tienen los esfuerzos de alta y baja intensidad utilizados en el calentamiento previo a la competición o prueba de rendimiento, y su relación con la EC.

Economía de carrera. Definición y formas de evaluación

El término economía de carrera (EC) suele referirse al estado estable de consumo de oxígeno a una intensidad determinada^{4,13,14}. Esta variable nos indica el gasto de energía necesario para realizar esa intensidad de carrera. La economía del esfuerzo es una variable que se ha utilizado en la literatura científica para la evaluación de deportes de resistencia¹⁵. Existen actualmente varias maneras de medir la EC. Por un lado, la principal forma y más comúnmente usada en la literatura científica es el coste de oxígeno. Dado que para la medición de EC es necesario conocer el

consumo de oxígeno (VO_2) del sujeto durante el esfuerzo, el coste de oxígeno es la manera más sencilla de conocer la EC. Puesto que para la medición de la EC es necesario que haya un estado estable en el VO_2 , las intensidades seleccionadas deberán estar por debajo del umbral de lactato^{4,16}, así como que los niveles de lactato en sangre sean similares a los basales¹⁷. Además, otra sencilla manera de conocer que existe un estado estable en el sujeto, es mediante el cociente respiratorio y que este se encuentre inferior al valor de 1 en las intensidades seleccionadas de carrera⁴. Este cociente respiratorio es la relación entre el consumo de CO_2 y de O_2 y puede servir para determinar el uso y producción de energía, así como el gasto energético de una actividad. Sin embargo, la medición de EC como coste de oxígeno, no tiene en cuenta los cambios en el sustrato energético usado durante la intensidad de carrera. Por eso, Fletcher, *et al.*¹⁸ compararon dos formas de medir EC, como coste de oxígeno y coste de energía, y concluyeron que esta última forma era más sensible a los cambios de intensidad y por lo tanto más correcta. La velocidad de carrera más utilizada en la literatura para medir EC es $16 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, aunque un rango entre 12 y $21 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ se ha utilizado en distintas investigaciones en función del nivel de la muestra utilizada^{4,6,19}. En una reciente revisión, Barnes y Kilding²⁰, establecieron unos rangos de intensidades en las que medir EC en función del nivel de la muestra en relación a sus valores de VO_{2max} : en atletas recreacionales ($54,2$ - $62,2 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$), estas intensidades irían entre 10 - $14 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; en corredores moderadamente entrenados ($62,2$ - $70,8 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) entre 12 - $16 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; en corredores altamente entrenados ($70,8$ - $75,4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) entre 12 - $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, y finalmente en corredores de nivel elite ($> 75,4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) entre 14 - $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Economía de carrera y su relación con el rendimiento

En literatura científica se ha documentado bastante bien la relación que existe entre EC y rendimiento en corredores de fondo y medio fondo. Recientemente, Hoogkamer, *et al.*²¹ llegaron a la conclusión que cambios en EC se trasladan directamente en cambios en el rendimiento. Estos autores compararon el incremento del peso del calzado deportivo y modificaciones en EC y rendimiento. Concluyeron que incrementos de 100 g en el peso del calzado, empeoraba la EC en un $1,1\%$ y esto a su vez reducía el rendimiento en un $0,78\%$ durante una prueba de 3.000 m . Esto nos quiere decir, que cualquier modificación que se produzca e influya en la EC, puede verse trasladado al resultado final de una competición. Por ejemplo, los corredores kenianos poseen pequeños tamaños en sus gastrocnemios en comparación con atletas europeos, teniendo menor peso alejado del eje de movimiento de sus piernas y por lo tanto, menor momento de inercia y requiere menor esfuerzo muscular en el movimiento de sus piernas²², como podría pasar con el mayor peso del calzado. Anteriormente, Pollock¹⁹ comprobó que existían diferencias en EC entre corredores elite (definido por el autor por poseer tiempos inferiores a los 30 minutos en un test de 6 millas) y buenos corredores, estableciendo esas categorías por nivel de rendimiento, y siendo más económicos aquellos de mejor rendimiento. Posteriormente, Conley y Kranhenbuhl⁴ establecieron la EC como buen predictor del rendimiento en la prueba de 10 km , ya

que aquellos atletas con mejor rendimiento eran los más económicos ($r = 0,83$). Más tarde, di Prampero, et al.²³ comprobaron que una mejora del 5% en EC se correspondía con una mejora del rendimiento de un 3,8%. Por otro lado, si tenemos en cuenta los cambios producidos a lo largo de un periodo de entrenamiento prolongado, Svedenhag y Sjodin²⁴ observaron mejoras en EC ($-1,0 \pm 0,3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ por año) tras un periodo largo de entrenamiento (22 meses aproximadamente) y a su vez, mejoras en el rendimiento en 5.000 m sin observar cambios en VO_2max . Esto nos indica que, en corredores entrenados, se puede llegar a la situación en el que no se observen cambios en el VO_2max , pero sí en el rendimiento, y una de las causas de ello podría ser por las mejoras en EC y en la velocidad a la que se obtiene el VO_2max ($v\text{VO}_2\text{max}$), como pudieron observar Morgan et al.¹⁶, donde EC y $v\text{VO}_2\text{max}$ fueron fuertes predictores del rendimiento en la prueba de 10 km.

Un ejemplo claro de la relación entre EC y rendimiento, es la progresión de la atleta Paula Radcliffe, que posee a día de hoy el récord del mundo de Maratón (2h15:25). Jones²⁵ evaluó los cambios fisiológicos de esta deportista a lo largo de más de 10 años. Pudo observar cómo su EC mejoró en un 15% (de $205 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ en 1992 a $175 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ en 2003) en ese periodo de tiempo, mejorando todas sus marcas desde distancias de 5.000 a Maratón. También, el atleta estadounidense Steve Scott, que tuvo el récord del mundo de la milla, mejoró su EC en un 5% a lo largo de una temporada de entrenamiento²⁶. Existe consenso en la literatura científica en relación a la importancia de la EC como factor de rendimiento y que su mejora es clave en la mejora del rendimiento de los corredores. Como podemos observar, la EC es una variable que se modifica con el entrenamiento de los corredores, pero saber qué tipo de entrenamiento y por qué es el más adecuado para su mejora, es fundamental. Como podemos ver en las Tablas 1 y 2, diversas investigaciones, han encontrado mejoras en EC y a su vez en la prueba de rendimiento usada en cada estudio, mostrando la relación entre mejora en EC y rendimiento.

Entrenamiento de resistencia y economía de carrera

Conocemos los efectos que tiene el entrenamiento de resistencia sobre el organismo. Se han observado mejoras en el sistema cardiorrespiratorio y la capacidad oxidativa del músculo esquelético^{27,28}. A su vez, la mejora de la capacidad oxidativa viene asociada con una mejor funcionalidad de la mitocondria^{6,29}, y todo esto conlleva una reducción en la utilización de oxígeno necesario para realizar un trabajo de intensidad submáxima³⁰ mejorando así la EC. Por otro lado, también se producirán cambios en la capacidad buffer del músculo esquelético³¹ y a nivel hematológico³². Aunque no están claros los mecanismos de la relación entre la capacidad buffer y una mejora en la eficiencia mecánica, estos procesos se han visto después de entrenamiento en altitud. Posiblemente sea dado a un uso más marcado en la oxidación de carbohidratos en comparación al de grasas³¹. Así como a nivel hematológico, se han visto incrementos en la masa de células rojas y su relación con mejoras en EC³². En relación al entrenamiento de resistencia y sus efectos en la EC, está bien establecido en la literatura científica que atletas entrenados son más económicos que aquellos menos entrenados³³.

En lo que refiere al entrenamiento, podemos encontrarnos dos métodos de entrenamiento de resistencia típicos y habituales en la actualidad que son usados por entrenadores y atletas en todas las partes del mundo. Estos métodos son el interválico, o también conocido por los anglosajones como *interval training*, y, por otro lado, el entrenamiento continuo. El entrenamiento interválico (en adelante INT), lo comenzó a utilizar en la década de 1920 el atleta finlandés Paavo Nurmi³⁴. Consiguió numerosas medallas en los Juegos Olímpicos de 1920, 1924 y 1928 en pruebas de fondo y medio fondo. Pero fue unos años más tarde cuando en la década de 1930, un entrenador y un médico (Gerschler y Reindell), ambos alemanes, introdujeron el término "interval training" y comenzó a ser más conocido fuera de sus fronteras³⁴. Este método puede ser definido como una serie de esfuerzos repetidos de corta a moderada duración (entre 10 segundos y 5 minutos) completados a una intensidad mayor al umbral anaeróbico^{35,36}. Este método tiene la peculiaridad de que pueden existir multitud de variantes en función a la duración del estímulo, la duración de la recuperación tras el estímulo y el número de repeticiones y series realizadas de tal estímulo. Un total de nueve variables se pueden manipular en este método y cambiar los efectos del mismo³⁷. La intensidad y duración del intervalo serán factores claves, el número de intervalos y series que componen esos intervalos, la recuperación entre intervalos y series influirán en el resultado final, así como la modalidad del deporte. Seiler y Hetlelid³⁸ investigaron la realización de $6 \times 4 \text{ min}$ a la máxima intensidad posible para esa sesión y esa tarea, en la que la única diferencia era la duración de la recuperación entre repeticiones (1, 2 y 4 min), modificando la intensidad de carrera. Pasar de 1 min de recuperación a 2 min, incrementó esa intensidad de trabajo, pero no si se pasaba de 2 a 4 min. El trabajo del VO_2 fue mayor con 2 min de recuperación mientras que el lactato en sangre no cambió. Si a su vez, dejaban elegir a los sujetos libremente la recuperación entre repeticiones, sorprendentemente ésta se aproximaba a los 2 min ($118 \pm 23\text{s}$). Esto es una muestra clara de lo complejo de manipular las variables que influyen en el método de entrenamiento INT.

Sin embargo, el método de entrenamiento continuo (en adelante CON) se caracteriza por un trabajo de menor intensidad y realizado sin pausas, es decir, de manera continua y a intensidad por debajo del umbral anaeróbico. Por lo tanto, la diferencia principal entre ambos métodos será la intensidad de trabajo durante el entrenamiento y, en definitiva, podrá determinar las modificaciones y mejoras que se produzcan en el organismo.

En cuanto a la manipulación de las variables volumen e intensidad del entrenamiento, no existe constancia hasta el momento que a mayor volumen de entrenamiento (que se puede caracterizar principalmente con el método CON en un gran porcentaje total del entrenamiento) esté relacionado con una mejor EC. Por eso, nos surge la duda de conocer qué intensidades son las óptimas para esa mejora, o qué combinación de intensidades y, por lo tanto, de métodos de entrenamiento, será el adecuado.

Conocemos gracias a la literatura científica que intensidades cercanas a la velocidad a la que se alcanza el consumo de oxígeno máximo se han utilizado habitualmente en entrenamientos de resistencia mediante el método INT. El entrenamiento INT en atletas recreacionales (Tabla 1) a intensidades entre 93-106% del VO_2max ³⁹ y entre el 90-95% de la frecuencia cardiaca máxima^{40,41} (FC máx.) han obtenido mejoras en EC

Tabla 1. Efectos del entrenamiento interválico y continuo en la economía de carrera y rendimiento en atletas de nivel recreacional. Participantes, diseño y resultados.

Estudio	Participantes	Diseño de investigación			Resultados	
	Descripción	Entto. Interválico (n)	Entto. Continuo (n)	Duración (entrenamientos/sem)	EC	Rendimiento
Franch <i>et al.</i> (1988)	n = 36 H; 30,4 años; 54,8 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas recreacionales	Largo (12) 4x4min con recuperación 2min, Corto (12) 30-40x 15s con recuperación de 15s	20-30 min a 15km/h de velocidad	2-3d/sem durante 6 sem	↑ 3,1% CON; ↑ 3,0% LARGO; ↑ 0,9% CORTO	TT al 87% vVO ₂ max: ↑ 94% CON; ↑ 67% LARGO; ↑ 65% CORTO
Sproule (1998)	n= 15 H; 23 años; 56 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Estudiantes EF		Efecto agudo de sesiones de 40-60min al 70-80% VO ₂ max. G1 40min al 80%; G2 60min al 70%; G3 60min al 80%	3x40-60 min al 80% VO ₂ max	↓4,4% (G1); 6,6% (G2); 9,5% (G3)	
Beneke y Hutler (2005)	n=16 H; 24,8 años; NP ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas recreacionales		Entto CON entre 20-30min durante las 4 primeras semanas (intensidad 50% FC reserva) y se incre- mentó a 45-60 de las semanas 5-8 (60-75% FC reserva).	8 sem: 3 sesiones en semana 1, 4 en semanas 2-6 y 5 en semanas 7 y 8.	↑ 10% CON	↑ 56% CON
Helgerud <i>et al.</i> (2007)	n = 40 H; 24,6 años; 57,8 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Estudiantes	Largo (10) 4x4 min al 90-95% Fcmax con 3 min rec al 70% Fcmax, Corto (10) 47x15s al 95% Fcmax con rec de 15s al 70% Fcmax	Ritmo lento (10) 45min al 70% Fcmax, ritmo umbral aneróbi- co (10) 25 min al 85% Fcmax	3d/sem durante 8 sem	Sin dif. entre grupos: ↑7,5-11,7%	
Quinn y Manley (2012)	n = 15 H; 35,3 años; 63,6 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Participantes sanos		Efecto de un entrena- miento continuo de larga duración (26 km)	Efecto agudo 1 sesión	Sin cambios en los días posteriores	
Zaton y Michalik (2015)	n = 17 (11H, 6M); 34 años; 50,7 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas recreacionales	G1 realizaba 2 sesiones de 4x20-30 s a maxima intensidad para completar 90- 200 m con recupera- ción activa (ratio 2:1) más una sesion entrea- namiento continuo a la semana.	G2: 3-4 sesiones a la semana de entrena- miento continuo sin especificar intensidad.	8 sem	↑17% significativo en %VO ₂ max relativo en G2	↑2,5% en G1 ↑1,3% en G2 en Test de Cooper
Gliemann <i>et al.</i> (2015)	n = 160 (73H, 84M); 47 años; 52,3 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas recreacionales	2 sesiones de 3-4 x 5min alternando 10-20-30 s con 2 min rec. Intensidad del 30, 60, 90-100% de la velocidad máxima + 1 sesión CON (75-85% Fcmax).	3 sesiones a la semana a intensidad 75-85% Fcmax	8 sem	↓2,85% INT, ↓ 1,95% CON	~
González-Mohino <i>et al.</i> (2016)	n = 11 H; 33,1 años; 56,7 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas recreacionales	3 sesiones/sem de repeticiones de 1, 2 y 3 min al 110%, 100% y 95% del vVO ₂ max	3 sesiones/sem al 70% y 75% del vVO ₂ max	6 sem	↑ 17,8 y 8,5% CON sig. al 60% y 90% vVO ₂ max	vVO ₂ max ↑ 7,9% INT
Hoydal y Hareide (2016)	n = 22 (8H, 14M); 27,7 años; 51,7 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Participantes sanos	4x4 min (11) entre 90-95% Fcmax, recuperación activa 3 min al 70%	75min (11) al 75% Fcmax	3 días/sem durante 8 sem	↑ 6% INT; 9% CON	3000 m: ↑ 3,06 min y 1,59 min (INT, CON)

Notas: ↑ incremento o mejora; ↓ reducción o empeoramiento; ~ se mantiene.

Abreviaciones: H: Hombre; M: Mujer; n: Número de participantes; EF: Educación física; Entto: Entrenamiento; G: Grupo; Fcmax: Frecuencia cardíaca máxima; CON: Método continuo; INT: Método interválico; VO₂max: Consumo máximo de oxígeno; vVO₂max: Velocidad a intensidad de consumo máximo de oxígeno; TT: Tiempo hasta extenuación; NP: No presenta.

entre el 1-9%. Sin embargo, otros autores no han encontrado mejoras de EC tras entrenamientos INT. Gliemann *et al.*⁴² no encontró cambios en EC tras 8 semanas con dos sesiones/semana de INT (alternando 10-20-30s a intensidad del 30%, 60% y 90-100% de la máxima velocidad de carrera). González-Mohino *et al.*⁹ no encontró mejoras en EC tras entrenamiento INT al 95-110% de la $v\dot{V}O_2$ max.

En relación al entrenamiento CON, una única sesión de entrenamiento de baja intensidad no produce cambios en EC^{43,44}, mostrando que es necesario un periodo de entrenamiento amplio para producir cambios. Zaton y Michalik⁴⁵ encontraron mejoras significativas en EC (17%) tras la realización de 3-4 sesiones semanales de CON (intensidad voluntaria por cada sujeto). Por otro lado, intensidades entre el 50-75% de la FC de reserva⁴⁶, del 70-85% de FC máxima^{40,41}, o del 70-75% de la $v\dot{V}O_2$ max⁹ produjeron mejoras en EC, aunque otros autores no observaron cambios a intensidades entre el 75-80% de FC máxima⁴². Sin embargo, la realización de sesiones entre 40-60 min a intensidades entre el 70-80% del $\dot{V}O_2$ max evaluado como efecto agudo produjo una reducción en EC en estudiantes de Educación Física⁴⁴, mostrándonos que no es aconsejable evaluar EC tras la sesión de entrenamiento.

En cuanto a lo que se refiere a resultados en corredores de nivel recreacional, las mejoras en EC podrían deberse a cambios biomecánicos que los harían más económicos a la misma intensidad de carrera⁴⁷. De ahí de la necesidad de incluir variables biomecánicas en las valoraciones de deportistas recreacionales cuando se evalúan cambios en EC.

En la Tabla 1, se pueden ver los estudios analizados en este apartado en relación a los atletas recreacionales. Pueden verse la diversidad de protocolos y resultados obtenidos en cada estudio.

En atletas entrenados, intensidades de entrenamiento INT del 100% $v\dot{V}O_2$ max^{48,49} han obtenido mejoras entre el 1-6,7%. Otros esfuerzos de alta intensidad como esprints máximos de 30 segundos⁵⁰ han encontrado mejoras del 6-7,2%, o intensidades del $v\Delta 50$ ⁵¹⁻⁵³ (intensidad correspondiente al 50% entre velocidad a umbral de lactato (vLT) y $v\dot{V}O_2$ max) han mostrado mejoras en EC entre un 3,6-5,4%. Además, el entrenamiento de alta intensidad también puede desarrollarse en distintas pendientes del terreno. Intensidades entre el 80-120% del $\dot{V}O_2$ max⁵⁴ (4-18% pendiente) han mostrado mejoras en EC.

Por otro lado, Billat *et al.*⁵⁵ investigaron la influencia del incremento de 1 a 3 sesiones de entrenamiento INT a la semana a intensidad del 100% $v\dot{V}O_2$ max compensado con 5 o 3 sesiones de CON respectivamente y su influencia en la EC. Estos autores encontraron un incremento del 6% en EC cuando se realizaba una única sesión de entrenamiento INT, comparado con un 2,7% cuando se incrementó a 3 sesiones a la semana, pero se redujo el de entrenamiento CON. Esto viene a decirnos, que la relación entre las sesiones de alta intensidad (INT) y baja (CON) es fundamental para la mejora de la EC en corredores entrenados. Enoksen *et al.*⁵⁶ realizaron un estudio en el que el grupo de entrenamiento INT realizó el 33% del total de entrenamiento mediante entrenamiento INT (3 sesiones/semana) entre el 82-92% de la FCmax, mientras que el restante era entrenamiento CON entre el 65-82% de la FCmax. El grupo de entrenamiento CON realizó el 13% del volumen total mediante entrenamiento INT (1 sesión/semana) y el restante, entrenamiento CON entre el 65-82% FCmax. La EC mejoró en ambos grupos, entre el 2,5-5% en el grupo INT y entre el 1,5-4,8% en el grupo CON. Finalmente, es importante destacar que intensidades de entrenamiento muy

altas (132% $v\dot{V}O_2$ max) no provocarían mejoras en EC³⁹, posiblemente dado a que limitaría mucho el volumen de entrenamiento realizable. La realización de entrenamiento INT y su efecto agudo sobre EC también ha sido estudiado. Collins *et al.*⁵⁷ evaluaron el efecto de tres sesiones de 10x400 con recuperaciones distintas (1,2 y 3min). En todas las sesiones, EC se vio perjudicada entre el 2-5%, indicándonos que no podemos evaluar la EC tras las sesiones de entrenamiento puesto que éstas sesiones de alta intensidad aumentan el coste de energía posterior en el corredor.

En cuanto al método de entrenamiento CON, entrenamientos a intensidad vOBLA^{58,59} (intensidad a la que se producen 4 mmol/L en el organismo) han provocado mejoras en EC del 2,8%. En la Tabla 2, se pueden ver los estudios analizados en este apartado en relación a los atletas entrenados. Pueden verse los protocolos escogidos y resultados obtenidos en cada estudio.

Como podemos observar, las mejoras en EC son superiores en proporción en los atletas de nivel recreacional respecto a los entrenados, poniendo de manifiesto la complejidad del entrenamiento a altos niveles para mejorar el rendimiento de los atletas. Además, nos indica que, a altos niveles de rendimiento, pequeñas mejoras en cualquier factor de rendimiento serán determinantes en el resultado final.

Finalmente, es importante destacar que los atletas suelen ser más económicos en las intensidades a las que suelen entrenar⁶⁰, por lo que es interesante incluir intensidades similares a las de competición. Los cambios en EC son dependientes de la intensidad de entrenamiento. En un estudio comparativo de Daniels y Daniels⁶¹ entre atletas de medio fondo y atletas de maratón, los resultados mostraron que los atletas eran más económicos en las intensidades propias en las que se desarrolla su competición (ya sea 1.500 m o Maratón). Por lo tanto, estas intensidades competitivas que serán de alta intensidad, nos llevaría a decantarnos por el entrenamiento INT para trabajar a esos ritmos y ser más eficientes.

Es transcendental conocer los efectos sobre la EC de ambos métodos de entrenamiento, pero la clave en el futuro de la investigación será la mejor combinación entre ambos y para ello es necesario estudios longitudinales que puedan abordar esta cuestión⁶².

Intensidad en el calentamiento, economía de carrera y rendimiento

Los esfuerzos realizados durante el calentamiento previo a la competición y su influencia en EC pueden determinar el rendimiento final, pero sin embargo ha sido poco estudiado hasta el momento. Como es bien sabido, el calentamiento es una práctica aceptada en cualquier deporte previo a un esfuerzo de mayor intensidad ya sea en el entrenamiento posterior o competición⁶³. El calentamiento activo es el más utilizado por los corredores dado su especificidad⁶³. El ejercicio de alta intensidad (80% del umbral de lactato o $v\Delta 50$) previo a una prueba de rendimiento puede alterar la respuesta del $\dot{V}O_2$ en la prueba de rendimiento, aumentar la amplitud del componente fundamental del $\dot{V}O_2$ y reducir el componente lento^{64,65}. Además, cualquier intervención que resulte en una rápida dinámica del $\dot{V}O_2$ (aceleración del $\dot{V}O_2$ respecto del basal mediante el incremento de la amplitud absoluta del $\dot{V}O_2$) tiende a dar como resultado una mejora del rendimiento⁶⁶.

Tabla 2. Efectos del entrenamiento interválico y continuo en la economía de carrera y rendimiento en atletas entrenados. Participantes, diseño y resultados.

Estudio	Participantes	Diseño de investigación		Resultados		
		Entto. Interválico (n)	Entto. Continuo (n)	Duración (entrenamientos/sem)	EC	Rendimiento
Sjödín y Svedenhag (1982)	n = 8 H; 19,8 años; 68,7 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas media y larga distancia		20 min a la vOBLA	1 día/sem durante 14 sem	↑ 2,8%	
Yoshida <i>et al.</i> (1990)	n = 6 M; 19 años; 51,8 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas entrenadas		6x vOBLA (20 min) + entto normal (120 min a velocidad umbral)	6 días/sem durante 8 sem	↑ 2,8%	↑ 3.000 m test
Billat <i>et al.</i> (1999)	n = 8 H; 24 años; 71,2 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas bien entrenados	Comparativa entre 1 sesión/sem o 3 a intensidad vVO ₂ max de entto INT compensado con 5 o 3 sesiones entto CON		4 sem: 1 sesión/sem y otras 4 sem: 3 sesiones/sem	↑ 6,1% con 1 sesión/sem, y 2,7% pasando de 1 a 3 sesiones/sem	↑ 2,9% en vVO ₂ max con 1 sesión/sem, y 1,9% con 3 sesiones/sem
Collins <i>et al.</i> (2000)	n = 7 H; 25,4 años; 72 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas altamente entrenados	Tres sesiones de 10x400 con variación en la recuperación (1,2,3 min)		Efecto agudo (3 sesiones aleatorias)	↓ 4,6% y ↓ 1,8% a 3,33 y 4,47 m·s ⁻¹	
Demarle <i>et al.</i> (2001)	n = 6 H; 27 años; 61,2 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas entrenados	2 sesiones INT (50% a intensidad vΔ50) en entto habitual. El número repeticiones se incrementaba a lo largo de las sem.		2x interval + 3x entto continuo durante 8 sem	↑ 3,6%	↑ 10,24 y 10,1% en vVO ₂ max en sólo 3 sujetos
Slawinski <i>et al.</i> (2001)	n = 6 H; 27 años; 61,2 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas entrenados	2 sesiones entto INT severo (vΔ50) y moderado (50%vVO ₂ max) a la semana + 3 sesiones de entto CON al 60%vVO ₂ max.		2xINT+ 3xCON, 8sem	↑ 3,6%	TT a 17km/h. ↑ 17% no sig TT a 17km/h. ↑ 17% no sig
Smith <i>et al.</i> (2001)	n = 27 H; 25,2 años; 61,4 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas bien entrenados	6x2 min vVO ₂ max + 1 x continuo al 60% o 5x 2,5 min al vVO ₂ max + 1 x continuo al 70% vVO ₂ max			↑ 3,3% grupo 60% y 0,8% grupo 70%. No sig.	↑ 6% TT vVO ₂ max en el grupo 60%.
Laffite <i>et al.</i> (2003)	n = 7 H; 24 años; 61,1 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas entrenados	2x Δ50 INT; 3xCON		3xINT, 2xCON, 8 sem	↑ 5,4%	Test incremental sin cambios
Denadai <i>et al.</i> (2006)	n = 17 H; 27,4 años; 59,5 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas entrenados	2 x INT al 95 o 100% vVO ₂ max + 1 sesión CON vOBLA + 3 sesiones entto CON al 60-70%vVO ₂ max		2días/sem de INT + 4 días entto CON durante 4 sem	↑ 2,6 en grupo 95%; ↑ 6,7% en grupo 100% vVO ₂ max	↑ 2% en 1.500 m y 1,4% en 5.000 en grupo 100% vVO ₂ max
Iaia <i>et al.</i> (2009)	n = 17 H; 33,9 años; 55,5 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas entrenados	(9)Remplazaron entto. Por 8-12x30" con 3' rec. Intensidad del 93% por 30" <i>sprint</i> máximo	(8) Entto habitual + entto de moderada intensidad	3-5 días/sem durante 4 sem	↑ 6-7,2% INT	~ Test 10k
Enoksen <i>et al.</i> (2011)	n = 26 H; 19,9 años; 70,3 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas bien entrenados	33% del entto al 82-92% de FCmax; el resto al 65-82% de FCmax (G1). 3 entto INT/sem	13% del entrenamiento al 82-92% de FCmax, y el restante al 65-82% (G2). 1 entto intervalo/sem		↑ 2,5-5% en G1; ↑ 1,5-4,8% en G2	~ TT a vVO ₂ max
Barnes <i>et al.</i> (2013)	n = 20 H; 21 años; 63,9 ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ ; Atletas entrenados larga distancia	En cuesta: (G1)12-24 x 8-12 s al 120%vVO ₂ max; (G2) 8-16 x 30-45 s al 110%vVO ₂ max; (G3) 5-9 x 2-2,5min al 100%vVO ₂ max; (G4) 4-7 x 4-5min al 90%vVO ₂ max; (G5) 1-3 x 10-25min al 80% vVO ₂ max. *Sumado al entto habitual		2días/sem durante 6 sem	↑ 2,4% (G1); ↑ 0,6 (G2); ↓ 1,2 (G3); ↓ 2,4 (G4); ↓ 3,2 (G5)	↑ 2,15% TT sin diferencias entre grupos

Notas: ↑ incremento o mejora; ↓ reducción o empeoramiento; ~ se mantiene.

Abreviaciones: H: Hombre; M: Mujer; n: Número de participantes; EF: Educación física; Entto: Entrenamiento; G: Grupo; FCmax: Frecuencia cardíaca máxima; CON: Método continuo; INT: Método interválico; VO₂max: Consumo máximo de oxígeno; vVO₂max: Velocidad a intensidad de consumo máximo de oxígeno; TT: Tiempo hasta extenuación; vOBLA: velocidad a partir de 4mmol/L; vΔ50: intensidad 50% entre velocidad a umbral de lactato (vLT) y vVO₂max; NP: No presenta.

De la poca investigación que relacione esfuerzos de alta intensidad, EC y rendimiento, algunos autores han encontrado aumentos en el coste de energía (reducción de la economía de carrera) entre el 3-7% después de ejercicio intenso^{57,67-71} por encima del umbral anaeróbico. Sin embargo, en un reciente estudio de Barnes y Kilding⁷², estos autores encontraron una mejora del rendimiento tras un calentamiento con una serie de esprints de 10 s con chaleco lastrado a intensidad similar a la de competición en prueba de 1.500 m. En este caso, la EC mejoró tras este calentamiento en un 6%, y estos autores asociaron la mejora del rendimiento a la mejora de la EC y en la rigidez de la pierna (variable neuromuscular). Hasta el momento, los estudios apuntan a que el trabajo de alta intensidad previo a la prueba de rendimiento o competición incrementa el coste de energía (empeoramiento de la EC), por lo que sería fundamental investigar qué tiempo de recuperación entre el esfuerzo de alta intensidad y la competición permitirá volver a niveles basales en las variables fisiológicas que intervengan y no perturbar el rendimiento posterior.

En lo que respecta al efecto de la intensidad del calentamiento en el rendimiento posterior, recientemente Zourdos *et al.*⁷³ llegaron a la conclusión de que un calentamiento a intensidad submáxima (45-65% VO_2max) tuvo un efecto pequeño en el rendimiento comparado con no realizar calentamiento. Por otro lado, van den Tillar *et al.*⁷⁴ compararon dos protocolos de calentamiento y evaluaron sus efectos sobre el rendimiento posterior. El primer protocolo fue mayor en duración (parte general más específica de alta intensidad) y el de menor duración sólo realizaron la parte específica (8x60 m *sprint*). No encontraron diferencias en el rendimiento entre protocolos de calentamiento y llegaron a la conclusión que, por eficiencia en el tiempo, el de corta duración podría ser una buena alternativa. Ingham *et al.*⁷⁵ usaron la intensidad propia de competición (800 m) para cuantificar la carga del calentamiento previo a la prueba de rendimiento. Llegaron a la conclusión que un esfuerzo sostenido (2x50 m + 200 m) de alta intensidad (intensidad de competición) mejoraba el rendimiento respecto a pequeños esfuerzos (6x50 m) de la misma intensidad. Como podemos ver, la inclusión de esfuerzos de alta intensidad en el calentamiento produce una mejora en el rendimiento posterior en las últimas investigaciones^{74,75} comparado con trabajos de baja intensidad⁷¹, aunque esfuerzos de alta intensidad podrían empeorar la EC^{57,67-71} y debería tenerse en cuenta, sobre todo el tiempo de transición entre los esfuerzos de alta intensidad y la competición o prueba de rendimiento.

Conclusiones

Como hemos visto, la EC es una variable fundamental y necesaria de evaluar para conocer las mejoras de los corredores dada su relación directa con el rendimiento. El entrenamiento de resistencia modificará esta variable, y la intensidad del entrenamiento será determinante para conseguirlo.

En lo que se refiere a corredores de nivel recreacional, existen resultados dispares en la comparativa entre INT y CON. Las recomendaciones para este grupo de deportistas es que la realización de entrenamiento periodizado y controlado producirá mejoras en EC a lo largo del tiempo. La inclusión de entrenamiento INT (2-3 sesiones semanales) irá en

progresión y siempre combinado con una gran cantidad de entrenamiento CON⁴², ya que una proporción superior de INT en relación a entrenamiento de baja intensidad (CON) no conllevaría una mejora en EC⁴⁵. El incremento del volumen de entrenamiento puede ser la causa principal de la mejora en EC, además de cambios biomecánicos⁴⁷. En cuanto a los corredores entrenados, la relación entre sesiones de alta intensidad (INT) y baja (CON) es fundamental para la mejora de EC⁵⁵. Intensidades cercanas a la vVO_2max se recomiendan para mejoras de EC y la velocidad asociada al VO_2max ⁵¹, pero éstas demasiado altas (132% VO_2max) no provocaría mejoras en EC posiblemente dado a que no es posible realizar suficiente volumen de entrenamiento de alta intensidad³⁹. Además, en atletas de largas distancias, entrenamiento CON a intensidad vOBLA⁵⁸ provocan mejoras en EC cercanas al 3%. Dada la multitud de metodologías aplicadas en los estudios revisados, es complejo encontrar una intensidad óptima para la mejora de la EC. En corredores entrenados, recomendamos intensidades cercanas al 100% vVO_2max para mejorar la EC, así como escoger intensidades cercanas a las propias de competición para mejorar la eficiencia en esos esfuerzos.

Finalmente, en relación al efecto de la intensidad de carrera en el calentamiento y EC, la realización de esfuerzos de alta intensidad^{57,67-71} reducen la EC entre el 3-7%. Esto nos quiere decir que necesitamos una amplia fase de transición y recuperación entre estos esfuerzos y la competición. Esta fase de transición podría estar entre los 9 min⁶⁷ y los 20 min². La incorporación de esfuerzos de alta intensidad^{74,75} mejoran el rendimiento final en comparación con los esfuerzos de baja intensidad⁷³.

Para finalizar, y como aplicación práctica, podemos recomendar a los entrenadores y atletas el uso de entrenamiento de alta intensidad (INT) en sus programas de entrenamiento. Tienen que tener en cuenta que este debe ir acompañado de entrenamiento de baja intensidad (CON) para poder asimilar esas cargas de entrenamiento. En atletas entrenados, se suele aconsejar que esta relación sea 80:20, primando en mayor medida el volumen de entrenamiento de baja intensidad y el 20% restante, por encima del umbral anaeróbico, como trabajo de alta intensidad⁷⁶. Además, se recomienda incluir intensidades similares a las propias de competición que puede ser recomendable tanto para atletas recreacionales como entrenados.

Bibliografía

- Hill AV, Lupton H. Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *Q J Med.* 1923;16:135-71.
- Ingham S, Whyte G, Pedlar C, Bailey D, Dunman N, Nevill A. Determinants of 800m and 1500m running performance using allometric models. *Med Sci Sports Exerc.* 2008;40:345-50.
- Enoksen E, Tjelta AR, Tjelta LI. Distribution of Training Volume and Intensity of Elite Male and Female Track and Marathon Runners. *Int J Sports Sci Coach.* 2011;6:273-93.
- Conley DL, Krahenbuhl GS. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 1980;12:357-60.
- di Prampero PE, Atchou G, Bruckner JC, Moia C. The energetics of endurance running. *Eur J Appl Physiol.* 1986;55:259-66.
- Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley JA. Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med.* 2004;34:465-85.
- Daniels JA. A Physiologist's view of running economy. *Med Sci Sports Exerc.* 1985;17:332-8.
- Morgan DW, Daniels JT. Relationship between VO_2max and the aerobic demand of running in elite distance runners. *Int J Sports Med.* 1994;15:426-9.

9. González-Mohino F, González-Ravé JM, Juárez D, Fernández FA, Barragán R, Newton RU. Effects of continuous and interval training on running economy, maximal aerobic speed and gait kinematics in recreational runners. *J Strength Cond Res.* 2016;30(4):1059-1066.
10. Shaw AJ, Ingham SA, Atkinson G, Folland JP. The correlation between running economy and maximal oxygen uptake: cross-sectional and longitudinal relationships in highly trained distance runners. *PLoS one.* 2015;10(4):e0123101.
11. Foster C, Lucia A. Running economy: the forgotten factor in elite performance. *Sports Med.* 2007;37:316-9.
12. Folland JP, Allen SJ, Black MI, Handsaker JC, Forrester SE. Running technique is an important component of running economy and performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2017;49(7):1412-23.
13. Morgan DW, Craib M. Physiological aspects of running economy. *Med Sci Sports Exerc.* 1992;24:456-61.
14. Anderson T. Biomechanics and running economy. *Sports Med.* 1996;22:76-89.
15. Winter EM, Jones AM, Davison RR, Bromley PD, Mercer TH. Sport and Exercise Physiology Testing Guidelines. London and New York. Volume I-Sport Testing: The British Association of Sport and Exercise Sciences Guide. Routledge; 2006. p. 58.
16. Morgan DW, Martin PE, Krahenbuhl GS. Factors affecting running economy. *Sports Med.* 1989;7:310-30.
17. MacDougall J. The anaerobic threshold: its significance for the endurance athlete. *Can J Appl Sport Sci.* 1977;2:137-40.
18. Fletcher JR, Esau SP, MacIntosh BR. Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *J Appl Physiol.* 2009;107:1918-22.
19. Pollock ML. Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners. Part I: cardiorespiratory aspects. *Ann NY Acad Sci.* 1977;30:310-22.
20. Barnes KR, Kilding AE. Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sports Med Open.* 2015;1:1-15.
21. Hoogkamer W, Kipp S, Spiering BA, Kram R. Altered Running Economy Directly Translates to Altered Distance-Running Performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2016;48:2175-80.
22. Kong PW, De Heer H. Anthropometric, gait and strength characteristics of Kenyan distance runners. *J Sports Sci Med.* 2008;7(4):499-504.
23. di Prampero PE, Capelli C, Pagliaro P, Antonutto G, Girardis M, Zamparo P, Soule RG. Energetics of best performances in middle-distance running. *J Appl Physiol.* 1993;74:2318-24.
24. Svedenhag J, Sjodin B. Physiological characteristics of elite male runners in and off-season. *Can J Appl Sport Sci.* 1985;10:127-33.
25. Jones AM. The physiology of the world record holder for the women's marathon. *Int J Sports Sci Coach.* 2006;1:101-16.
26. Conley DL, Krahenbuhl GS, Burkett LN, Millar AL. Following Steve Scott: physiological changes accompanying training. *Phys Sportsmed.* 1984;12:103-6.
27. Holloszy JO, Rennie MJ, Hickson RC, Conlee RK, Hagberg JM. Physiological consequences of the biochemical adaptations to endurance exercise. *Ann NY Acad Sci.* 1977;301:440-50.
28. Holloszy J, Coyle E. Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J Appl Physiol.* 1984;56:831-8.
29. Tonkonogi M, Walsh B, Svensson M, Sahlin K. Mitochondrial function and antioxidant defence in human muscle: effects of endurance training and oxidative stress. *J Physiol.* 2000;528:379-88.
30. Assumpção CO, Lima LC, Oliveira FB, Greco CC, Denadai BS. Exercise induced muscle damage and running economy in humans. *Sci World J.* 2013;2013:1-11.
31. Gore CJ, Hahn AG, Aughey RJ, Martin DT, Ashenden MJ, Clark SA, et al. Live high: train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiol Scand.* 2001;173:275-86.
32. Levine BD, Stray-Gundersen J. "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J Appl Physiol.* 1997;83:102-12.
33. Morgan DW, Bransford DR, Costill DL, Daniels JT, Howley ET, Krahenbuhl GS. Variation in the aerobic demand of running among trained and untrained subjects. *Med Sci Sports Exerc.* 1995;27:404-9.
34. Tjelta LI. The training of international level distance runners. *Int J Sports Sci Coach.* 2016;11:122-34.
35. Billat LV. Interval training for performance: a scientific and empirical practice: special recommendations for middle- and long-distance running. Part I: aerobic interval training. *Sports Med.* 2001;1:13-31.
36. Laursen PB, Jenkins DG. The scientific basis for high-intensity interval training. *Sports Med.* 2002;32:53-73.
37. Buchheit M, Laursen PB. High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle. *Sports Med.* 2013;43:313-38.
38. Seiler S, Hetlelid KJ. The impact of rest duration on work intensity and RPE during interval training. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37:1601-7.
39. Franch J, Madsen K, Djurhuus MS, Pedersen PK. Improved running economy following intensified training correlates with reduced ventilatory demands. *Med Sci Sports Exerc.* 1998;30:1250-6.
40. Hoydal KL, Hareide S. Evaluating and comparing the effect of high intensity interval training vs. low intense, longer-lasting training on endurance performance in recreational runners. *Int J Appl Sport Med.* 2016;28:101-10.
41. Helgerud J, Hoydal K, Wang E, Karlsen T, Berg P, Bjerkaas M, et al. Aerobic High-Intensity Intervals Improve VO2max More Than Moderate Training. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39:665-71.
42. Gliemann L, Gunnarsson TP, Hellsten Y, Bangsbo J. 10-20-30 training increases performance and lowers blood pressure and VEGF in runners. *Scand J Med Sci Sports.* 2015;25:479-89.
43. Quinn TJ, Manley MJ. The impact of a long training run on muscle damage and running economy in runners training for a marathon. *J Exerc Sci Fit.* 2012;10:101-6.
44. Sproule J. Running economy deteriorates following 60 min of exercise at 80% VO2max. *Eur J Appl Physiol.* 1998;77:366-71.
45. Zaton M, Michalik K. Effects of interval training-based glycolytic capacity on physical fitness in recreational long-distance runners. *Hum Mov.* 2015;16:71-7.
46. Beneke R, Hutler M. The effect of training on running economy and performance in recreational athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37:1794-9.
47. Moore IS, Jones AM, Dixon SJ. Mechanisms for improved running economy in beginner runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2012;44:1756-63.
48. Smith TP, Coombes JS, Geraghty DP. Optimising high-intensity treadmill training using the running speed at maximal O2 uptake and the time for which this can be maintained. *Eur J Appl Physiol.* 2003;89:337-43.
49. Denadai BS, Ortiz MJ, Greco CC, de Mello MT. Interval training at 95% and 100% of the velocity at VO2max: effects on aerobic physiological indexes and running performance. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2006;31:737-43.
50. Iaia FM, Hellsten Y, Nielsen JJ, Fernström M, Sahlin K, Bangsbo J. Four weeks of speed endurance training reduces energy expenditure during exercise and maintains muscle oxidative capacity despite a reduction in training volume. *J Appl Physiol.* 2009;106:73-80.
51. Slawinski JJ, Demarle A, Koralsztein JP, Billat VL. Effect of supra-lactate threshold training on the relationship between mechanical stride descriptors and aerobic energy cost in trained runners. *Arch Physiol Biochem.* 2001;109:110-6.
52. Demarle AP, Slawinski JJ, Laffite LP, Bocquet VG, Koralsztein JP, Billat VL. Decrease of O2 deficit is a potential factor in increased time to exhaustion after specific endurance training. *J Appl Physiol.* 2001;90:947-53.
53. Laffite LP, Mille-Hamard L, Koralsztein JP, Billat VL. The effects of interval training on oxygen pulse and performance in supra-threshold runs. *Arch Physiol Biochem.* 2003;111:202-10.
54. Barnes KR, Hopkins WG, McGuigan MR, Kilding AE. Effects of different uphill interval-training programs on running economy and performance. *Int J Sports Physiol Perform.* 2013;8:639-47.
55. Billat VL, Flechet B, Petit B, Muriaux G, Koralsztein JP. Interval training at VO2max: effects on aerobic performance and overtraining markers. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;31:156-63.
56. Enoksen E, Shalfawi SA, Tønnessen E. The effect of high- vs. low-intensity training on aerobic capacity in well-trained male middle-distance runners. *J Strength Cond Res.* 2011;25:812-8.
57. Collins MH, Pearsall DJ, Zavorsky GS, Bateni H, Turcotte RA, Montgomery DL. Acute effects of intense interval training on running mechanics. *J Sports Sci.* 2000;18:83-90.
58. Sjodin B, Jacobs I, Svedenhag J. Changes in onset of blood lactate accumulation (OBLA) and muscle enzymes after training at OBLA. *Eur J Appl Physiol.* 1982;49:45-57.
59. Yoshida T, Udo M, Chida M, Ichioka M, Makiguchi K, Yamaguchi T. Specificity of physiological adaptation to endurance training in distance runners and competitive walkers. *Eur J Appl Physiol.* 1990;61:197-201.
60. Jones AM, Carter H. The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. *Sports Med.* 2000;29:373-86.
61. Daniels J, Daniels N. Running economy of elite male and elite female runners. *Med Sci Sports Exerc.* 1992;24:483-9.
62. Berg K. Endurance training and performance in runners. *Sports Med.* 2003;33:59-73.
63. Bishop D. Warm up I. Potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. *Sports Med.* 2003;33:439-54.
64. Burnley M, Jones AM, Carter H, Doust JH. Effects of prior heavy exercise on phase II pulmonary oxygen uptake kinetics during heavy exercise. *J Appl Physiol.* 2000;89:1387-96.

65. Burnley M, Doust JH, Carter H, Jones AM. Effects of prior exercise and recovery duration on oxygen uptake kinetics during heavy exercise in humans. *Exp. Physiol.* 2001;86:417-25.
66. Bailey S, Vanhatalo A, Wilkerson DP, Dimenna FJ, Jones AM. Optimizing the "priming" effect: influence of prior exercise intensity and recovery duration on O₂ uptake kinetics and severe-intensity exercise tolerance. *J Appl Physiol.* 2009;107:1743-56.
67. Brueckner JC, Atchou G, Duvallet A, Barrault D, Jousselin E, Rieu M, et al. The energy cost of running increases with the distance covered. *European J Appl Physiol.* 1991;62:385-9.
68. Xu F, Montgomery DL. Effect of prolonged exercise at 65% and 80% of VO₂max on running economy. *Int J Sports Med.* 1995;16:309-15.
69. Guezennec CY, Vallier JM, Bigard AX, Durey A. Increase in energy cost of running at the end of a triathlon. *Eur J Appl Physiol.* 1996;73:440-5.
70. Zavorsky GS, Montgomery DL, Pearsall DJ. Effect of intense interval workouts on running economy using three recovery durations. *Eur J Appl Physiol.* 1998;77:224-30.
71. Hunter I, Smith GA. Preferred and optimal stride frequency, stiffness and economy: changes with fatigue during a 1-h high-intensity run. *Eur J Appl Physiol.* 2007;100:653-61.
72. Barnes KR, Hopkins WG, McGuigan MR, Kilding AE. Warm-up with a weighted vest improves running performance via leg stiffness and running economy. *J Sci Med Sport.* 2015;18:103-8.
73. Zourdos MC, Bazylar CD, Jo E, Khamoui AV, Park BS, Lee SR, et al. Impact of a Submaximal Warm-Up on Endurance Performance in Highly Trained and Competitive Male Runners. *Res Q Exerc Sport.* 2017;88:114-9.
74. van den Tillaar R, Vatten T, von Heimburg E. Effects of Short or Long Warm-up on Intermediate Running Performance. *J Strength Cond Res.* 2017;31:37-44.
75. Ingham SA, Fudge BW, Pringle JS, Jones AM. Improvement of 800-m running performance with prior high-intensity exercise. *Int J Sports Physiol Perform.* 2013;8:77-83.
76. Seiler S. What is best practice for training intensity and duration distribution in endurance athletes? *Int J Sports Physiol Perform.* 2010;5(3):276-91.