



**RICYDE. Revista Internacional de
Ciencias del Deporte**
ISSN: 1885-3137
ricyde@cafyd.com
Editorial Ramón Cantó Alcaraz
España

Ogueta-Alday, Ana; García-López, Juan
Factores que afectan al rendimiento en carreras de fondo
RICYDE. Revista Internacional de Ciencias del Deporte, vol. XII, núm. 45, julio, 2016, pp.
278-308
Editorial Ramón Cantó Alcaraz
Madrid, España

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=71046278006>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

Factores que afectan al rendimiento en carreras de fondo **Factors affecting long-distance running performance**

Ana Ogueta-Alday¹, Juan García-López²

1. Universidad de Deusto. España

2. Universidad de León. España

Resumen

Las carreras de fondo (comprendidas entre los 5 km hasta la maratón) han crecido en España tanto en número como en participación. Esto ha suscitado un gran interés en entrenadores y deportistas, que solicitan información y formación sobre los diferentes factores que afectan al rendimiento. Ante esta demanda, el número de investigaciones ha aumentado notablemente. El objetivo de esta revisión bibliográfica ha sido analizar los factores que afectan al rendimiento en carreras de fondo desde sus diferentes perspectivas. Para ello, se ha realizado una revisión bibliográfica en 3 bases de datos (Medline, SportDiscus y Google Scholar) y los factores han sido clasificados en 5 grandes grupos, subdivididos a su vez en diferentes apartados: 1- ambientales (aire/viento, temperatura, humedad, altura y pendiente del terreno), 2- ligados al entrenamiento (entrenamiento de resistencia, fuerza, en ambientes calurosos y en altura), 3- fisiológicos ($VO_{2\text{max}}$, umbrales ventilatorios, economía de carrera, edad, género, tipos de fibras musculares, fatiga y raza), 4- biomecánicos (antropometría, leg-stiffness, flexibilidad, patrón de pisada, calzado, ortesis plantares y parámetros espacio-temporales) y 5- psicológicos (estrategias de intervención, dirección de la atención y música). La influencia de algunos de éstos sobre el rendimiento es ampliamente conocida; sin embargo, en el caso de algunos factores psicológicos (dirección de la atención y música) y biomecánicos (patrón de pisada y parámetros espacio-temporales) el número de estudios es escaso o los resultados poco concluyentes. La realización de más estudios, conjuntamente con el avance de las nuevas tecnologías y sistemas de medición, permitirá un mejor conocimiento sobre la temática.

Palabras clave: carrera; resistencia; rendimiento; revisión.

Abstract

The number of competitions and participation on long-distance races (from 5 km to the marathon) in Spain has grown significantly during the last few years. Due to this popularity, both coaches and runners are interested on learning about the factors that affect long-distance running performance. Facing this new reality, scientific literature has been concerned about the aforementioned factors, and the amount of studies has considerably grown. Therefore, the purpose of this review is to analyse factors affecting long-distance running performance from different points of view. Literature review was performed through 3 different databases (Medline, SportDiscus and Google Scholar) and the factors were classified into 5 main groups, subdivided into different sections: 1- environmental (air/wind, temperature, humidity, altitude and slope of the ground), 2- training-related (endurance, resistance, training in hot environments and in altitude), 3- physiological ($VO_{2\text{max}}$, thresholds, running economy, age, gender, muscle fibre type, fatigue and race), 4- biomechanical (anthropometry, leg-stiffness, flexibility, foot strike pattern, footwear, foot orthoses and spatio-temporal parameters) and 5- psychological (intervention strategies, direction of attention and music). Even though the influence of some of these factors on running performance is quite well-known, the influence of some psychological (direction of attention and music) and biomechanical factors (foot strike pattern and spatio-temporal parameters) is still unclear. There are few studies or the results cannot be generalized. Future studies and the progress of new technologies and measurement tools will provide a better understanding.

Key words: running; endurance; performance; review.

Correspondencia/correspondence: Ana Ogueta-Alday
Facultad de Psicología y Educación. Universidad de Deusto. España
Email: ana.ogueta@deusto.es

Introducción

La práctica deportiva de la carrera a pie ha aumentado en popularidad durante la última década, de forma que en España es la quinta actividad física más practicada (García Ferrando y Llopis Goig, 2010). Del total de personas que realiza actividad física, el 22.6% afirma que realiza carrera a pie (García Ferrando y Llopis Goig, 2010). Paralelamente, y muchas veces promovido por los intereses de mercado (i.e., industria textil y del calzado, sponsors, operadores turísticos), el número de carreras populares ha aumentado un 50% desde el 2008, llegando a celebrarse, a día de hoy, cerca de 3000 carreras populares anuales repartidas por toda la geografía española (Suances, 2014). Y no sólo han aumentado el número de eventos celebrados, sino también el número de participantes en las mismas. Por ejemplo, en la San Silvestre Vallecana se ha pasado de 6500 corredores a 40000 desde el año 1999 al 2015 (Suances, 2014). Este tipo de carreras populares se celebran sobre diferentes distancias, que normalmente van desde los 5 km a los 42.195 km de la maratón, lo que la International Association of the Athletics Federations (IAAF, s. f.) denomina como carreras de fondo o larga distancia. En las mismas se dan cita desde los mejores atletas del país hasta corredores de nivel más popular, siendo el abanico de rendimiento muy variado. Esto ha propiciado un marcado interés dentro de la comunidad científica, que se ha interesado por estudiar los factores que afectan el rendimiento desde diferentes puntos de vista (i.e., fisiología, entrenamiento o biomecánica), y que se abordarán a continuación.

La mayoría de los estudios que han esquematizado la influencia de estos factores en el rendimiento lo han realizado a través de la economía de carrera (i.e., gasto energético a una velocidad de carrera submáxima determinada) (Saunders, Pyne, Telford y Hawley, 2004). Así, Svedenhag (2000) identificó 13 factores determinantes de la economía de carrera (distancia de la especialidad, entrenamiento y puesta a punto, pendiente del terreno, temperatura, aire y viento, fatiga, ventilación, amplitud de zancada, rigidez/componentes elásticos, otros factores biomecánicos, género, edad y estado emocional/psicológico). A su vez, Saunders y col. (2004) los agruparon y dividieron en 5 grandes grupos (entrenamiento, ambientales, fisiológicos, biomecánicos y antropométricos). Y aunque los factores que se comentan tienen repercusión en la economía de carrera, y ésta a su vez en el rendimiento, la economía de carrera no deja de ser uno más dentro de los factores fisiológicos que afecta al rendimiento (Basset y Howley, 2000). Por lo tanto, para esta revisión se ha optado por adaptar y ampliar las clasificaciones anteriores, identificando 5 grandes bloques de factores (ambientales, entrenamiento, fisiológicos, biomecánicos y psicológicos) que afectan al rendimiento durante las carreras de fondo (Figura 1).

Factores que afectan al rendimiento en carreras de fondo				
1. Ambientales	2. Entrenamiento	3. Fisiológicos	4. Biomecánicos	5. Psicológicos
1.1. Aire/viento	2.1. Resistencia	3.1. $VO_{2\max}$	4.1. Antropometría	5.1. Intervención
1.2. Temperatura	2.2. Fuerza	3.2. Umbral ventilatorio	4.2. Leg-stiffness	5.2. Dirección atención
1.3. Humedad	2.3. Aclimatación calor	3.3. Economía carrera	4.3. Flexibilidad	5.3. Música
1.4. Altitud	2.4. Altura	3.4. Edad	4.4. Patrón de pisada	
1.5. Pendiente terreno		3.5. Género	4.5. Calzado	
		3.6. Fibras musculares	4.6. Osteosis plantares	
		3.7. Fatiga	4.7. Parámetros e-t	
		3.8. Raza		

Figura 1. Factores que afectan al rendimiento de las carreras de fondo.

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos Medline, SportDiscus y Google Scholar, tratando de ofrecer un estado de conocimiento actual sobre los factores que afectan al rendimiento en las carreras de fondo. Para la realización de la búsqueda se seleccionaron las palabras “running” y “performance”, y se combinaron con otras palabras como “long-distance”, “humidity”, “strength”, “training”, “spatio-temporal parameters”, etc.

Factores ambientales

Los factores ambientales (aire o viento, temperatura, humedad, altura, pendiente del terreno) están altamente ligados con las condiciones climatológicas o localización geográfica de la competición, y juegan un papel muy importante sobre el rendimiento que se consigue en la misma.

Aire o viento

El aire o viento contra el que se enfrenta el corredor, o la velocidad a la que el corredor choca contra el aire, afecta negativamente al rendimiento, ya que para vencer esa resistencia el corredor necesita aplicar una mayor fuerza, lo que supone un mayor gasto de energía (García-López, 2008). La resistencia aerodinámica constituye entre un 4-8% de la resistencia total al avance en carreras de 800-5000 m, y aproximadamente un 2% en carreras de entre 5000 m y maratón (Saunders y col., 2004). El perjuicio es mayor cuanto más rápido se corre y se debe a que el VO₂ necesario para superar la resistencia del aire aumenta al cubo de la velocidad de carrera (Pugh, 1970). Este mismo hecho provoca que el perjuicio ocasionado por el “viento en contra” sea mayor que el beneficio de tener “viento a favor”, y por tanto la imposibilidad de batir una marca personal o un record cuando estas carreras de larga distancia se realizan en una pista circular en la que haya viento (García-López, 2008). La relevancia de la resistencia aerodinámica en la carrera de fondo también se ve reflejada durante las evaluaciones en tapiz rodante que son llevadas a cabo en los laboratorios, habiéndose establecido que utilizar una inclinación del tapiz del 1% a velocidades de carrera entre 10 y 18 km·h⁻¹ permite simular la resistencia del viento (Jones y Doust, 1996). Por otro lado, si el corredor se encuentra tras otro corredor (en inglés “drafting”) a una distancia entre 1-2 m, la energía requerida para vencer el aire disminuye aproximadamente a la mitad (García-López, 2008). No obstante, ningún estudio ha valorado el efecto que tendría este hecho en ambientes calurosos, donde la termorregulación del corredor juega un papel importante.

Temperatura

El efecto de la temperatura en el rendimiento de las carreras de fondo ha sido ampliamente estudiado (Sawka, Cheuvront y Kenefick, 2015). En los primeros trabajos se cifró un margen de 10-15°C como rango de temperatura óptima, indicando que las temperaturas ligeramente inferiores eran menos perjudiciales que las ligeramente superiores (Maughan, 2010; Sawka y col., 2015). Ely, Cheuvront, Roberts y Montain (2007) observaron un rendimiento similar entre 5-10°C y 10-15°C, empeorando progresivamente a partir de los 15°C. Del mismo modo, El Helou y col. (2012) observaron que la velocidad de carrera puede disminuir 0.03% por cada incremento de 1°C a partir de los 10°C. Además, el número de intervenciones médicas durante las carreras se ve aumentado por debajo de los 5°C y a partir de los 15°C (El Helou y col., 2012). Por lo tanto, podemos afirmar que el rango óptimo de temperatura durante las carreras de fondo oscila entre 5-15°C. De hecho, el record del mundo de maratón, superado por Dennis Kimetto (KEN) en Berlín (2014) con un tiempo de 2:02:57 hh:mm:ss, se consiguió a una temperatura de ~8°C (IAAF, 2014).

Los corredores de élite han demostrado tener un mejor comportamiento en temperaturas adversas en comparación con los corredores de menor nivel. Esta ventaja no sólo será aprovechada en competición, sino también durante los entrenamientos, permitiéndoles realizar cargas de trabajo más elevadas (Berg, 2003). Los corredores de menor nivel: 1- están más tiempo expuestos a las condiciones ambientales, porque sus ritmos son más lentos para la misma distancia (Ely y col., 2007), 2- suelen correr en grupo, lo que triplica el estrés térmico al reducirse la pérdida de calor por convección, suponiendo un aumento de 2°C (Ely y col., 2007), y 3- suelen ser corredores más grandes y pesados, por lo que producen y acumulan mayor cantidad de calor a una misma velocidad de carrera que los corredores de mayor nivel, que son más pequeños y ligeros (Berg, 2003). Este último factor está relacionado con la escala alométrica (en inglés “allometric scaling”), donde la producción de calor estaría relacionada con la masa corporal, mientras que su disipación dependería de la superficie corporal (Cheuvront y Haymes, 2011). De esta forma, los corredores de mayor nivel pueden correr a mayor intensidad y durante más tiempo antes de llegar a una temperatura rectal límite o de fatiga, que se ha cifrado entre 39.5-40.0°C (Berg, 2003; Nielsen y col. 1993). Otros autores hablan de la temperatura de la piel, la cual debe mantenerse por debajo de los 35.5°C para que el sujeto no se vea obligado a abandonar, debido a una disminución del volumen sistólico, y un aumento de la frecuencia cardiaca y del gasto cardiaco. No obstante, algunos autores han observado que es la diferencia entre la temperatura rectal y la de la piel la que determina el deterioro del rendimiento o el abandono de la actividad, puesto que hay corredores que son capaces de mantener una temperatura rectal muy elevada con una baja temperatura de la piel (Cuddy, Hailes y Ruby, 2014).

Por otro lado, la edad no parece ser un factor determinante en la termorregulación, en tanto que estudios realizados en corredores con similar nivel de rendimiento han encontrado respuestas termorreguladoras similares entre corredores jóvenes y de mediana edad (28 vs. 54 años) (de Paula Viveiros, Amorim, Alves, Passos y Meyer, 2012). Sin embargo, la influencia del género es importante, puesto que los hombres se ven más afectados por la temperatura que las mujeres, ya que éstas presentan mayor porcentaje de superficie corporal respecto a su masa (lo que les permite tener una mayor tasa de evaporación), corren a menor velocidad y presentan mayor variabilidad del rendimiento, dependiendo menos su resultado de la variable termorregulación (Ely y col., 2007).

Humedad

Los efectos de la humedad en el rendimiento durante las carreras de fondo también son claros, determinándose que una mayor humedad en combinación con una elevada temperatura provoca un mayor estrés térmico que sólo una alta temperatura. Algunos autores han observado que la velocidad de carrera en una prueba de 8 km es 1.5 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ mayor con “frío” (15°C) y humedad (60%), que con calor (35°C) y humedad (60%) (Marino, Lambert y Noakes, 2004). En esta última situación se limita la evaporación del sudor, ya que el cuerpo sigue perdiendo agua y electrolitos sin pérdida efectiva de calor (Maughan, 2010). Aunque los corredores pueden beber *ad libitum* durante las carreras, se ha observado que en la mayoría de los casos no se repone lo suficiente, lo que provoca una deshidratación (Sawka y col., 2015). Estos mismos autores recogen que cuando la pérdida de agua supera el 2% del peso corporal, el rendimiento en carreras que se desarrollan a temperaturas elevadas se ve perjudicado (Sawka y col., 2015). Un ejemplo de la importancia de la humedad lo observamos al comparar el Campeonato del Mundo de Maratón de Daegu 2011 (35 m altitud, 26°C y 72% de humedad) y el Campeonato del Mundo de Berlín 2009 (34 m altitud, 23°C y 41% humedad). El tiempo medio de las 10 primeras clasificadas fue 3 min 21 s mayor en

circunstancias de mayor humedad (2:29:47 hh:mm:ss vs. 2:26:26 hh:mm:ss, respectivamente) (IAAF, s.f.). No obstante, en otros campeonatos como el de Paris 2003, la temperatura fue baja (15°C) y la humedad alta (72%), obteniéndose todavía un mejor rendimiento (tiempo medio de las 10 mejores: 2:25:50 hh:mm:ss). Esto se debe a que a temperaturas mayores de 25°C es cuando la humedad adquiere mayor importancia. Algunas entidades como la Asociación de Atletismo de Estados Unidos (NCAA) y la Asociación Americana de Medicina del Deporte (ACSM) optan por utilizar un indicador del estrés térmico denominado WBGT (Wet Bulb Globe Temperature). Este índice incluye la temperatura, humedad y radiación solar, siendo necesario un valor menor de 28°C para la celebración de competiciones de más de 16 km (Ely y col., 2007).

Altitud

Los efectos de la altitud en el rendimiento y la economía de carrera también han sido estudiados. Se ha observado que cada 1000 m por encima del nivel del mar (0 m), el tiempo para completar una maratón aumenta ~ 11%, tanto en hombres como en mujeres (Lara, Salinero y Del Coso, 2014). Por lo tanto, si el objetivo de la carrera es obtener una buena marca personal, habría que decantarse por participar en carreras que se celebren a nivel de mar (e.g., maratón de Rotterdam). Con la altitud, el descenso de la presión atmosférica se ve acompañado de una disminución de la presión parcial de oxígeno, lo que dificulta los procesos aeróbicos del deportista (García-López, 2008). Roi, Giacometti y Von Duvillard (1999) observaron que el $VO_{2\text{max}}$ disminuía entre un 1.5-3.5% cada 300 m de aumento a partir de los 1500 m de altitud. La economía de carrera también empeora con la altitud, ya que aumenta el trabajo de los músculos respiratorios, que constituye ~7% del gasto energético total (Svedenhag, 2000), habiéndose calculado que a 3500 m de altitud este trabajo es 2.5 veces mayor que a nivel del mar (Roi y col., 1999). Así, el mayor rendimiento en pruebas de fondo se dará a nivel del mar (0 m de altitud), si bien es cierto que los corredores de élite se verán menos afectados por la altitud, ya que son capaces de mantener un mayor porcentaje de su $VO_{2\text{max}}$ durante más tiempo.

Pendiente del terreno

La pendiente del terreno es otra variable a tener en cuenta en las carreras que se celebran fuera de las pistas de atletismo. Instintivamente los sujetos tienden a autorregularse dependiendo de los diferentes gradientes y superficies del terreno, y son los corredores que más varían y adaptan su velocidad de carrera en función de las circunstancias, manteniendo el nivel de esfuerzo y la frecuencia de zancada, los que obtienen un mejor resultado (Townshend, Worringham y Stewart, 2010). Manteniendo una misma intensidad de esfuerzo, se conoce que la velocidad que se pierde corriendo cuesta arriba (23%) no se recupera corriendo cuesta abajo (ganancia de tan sólo 14%). Esto supone una pérdida total del 9% en carreras con pendientes del 6-12%, por lo que el rendimiento total se ve perjudicado (Townshend y col., 2010). La economía de carrera, también varía en función de la pendiente. Se ha observado que a velocidad constante y submáxima ($12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), la carrera cuesta abajo con una pendiente del -5% presenta una mejor economía de carrera, seguida de la carrera en llano y cuesta arriba con un +5% de inclinación (34.6 , 42.5 y $51.5 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, respectivamente) (Abe y col., 2011). Debido a estos resultados, en los estudios sobre economía de carrera llevados a cabo en tapiz rodante, es importante controlar la pendiente que simula la resistencia del viento (Jones y Doust, 1996).

Factores ligados al entrenamiento

El entrenamiento está fuertemente relacionado con otros factores que afectan al rendimiento, y es uno de los instrumentos más potentes para influir y/o modificar algunos parámetros que serán comentados en esta revisión. El presente apartado ha sido dividido en cuatro tipologías básicas de entrenamiento (de resistencia, de fuerza, en ambientes calurosos y en altura), para analizar sus efectos en el rendimiento en carreras de fondo.

Entrenamiento de resistencia

El entrenamiento de resistencia es tradicionalmente el tipo de entrenamiento que ha ocupado la mayor parte del volumen de trabajo de un corredor de fondo, ya que se conoce su fuerte relación con el rendimiento (Ogueta-Alday, Rodríguez-Marroyo y García-López, 2013b). La frecuencia del mismo en corredores de categoría sub-élite y élite es bastante homogénea, ~ 10-14 sesiones que constituyen ~ 80-120 kilómetros de carrera por semana. Lo que varía en los programas de entrenamiento es la diferente combinación que se hace entre volumen, intensidad e intervalos de descanso (Esteve-Lanao, Foster, Seiler y Lucia, 2007; Laursen y Jenkins, 2002; Midgley y col., 2007). Destacar la dificultad de investigar estos parámetros en corredores de alto nivel, reacios muchas veces a dejar atrás su planificación para llevar a cabo este tipo de intervenciones (Laursen y Jenkins, 2002). Así, gran parte de las conclusiones obtenidas son derivadas de estudios realizados con personas sedentarias o corredores de bajo nivel, no siendo aplicables a corredores de alto nivel (Laursen y Jenkins, 2002). De hecho, un aumento del volumen de entrenamiento a velocidades submáximas provoca adaptaciones fisiológicas en corredores de bajo nivel, pero no en corredores altamente entrenados. Se ha observado que estos últimos podrían mejorar su rendimiento a través de entrenamientos interválicos de alta intensidad (i.e., HIT o repetición de periodos cortos de ejercicio entre 10 s y 5 min a una intensidad por encima del VT2 intercalados con periodos cortos de descanso o actividad a baja intensidad). A través de este tipo de entrenamiento el rendimiento en 10 km podría mejorar hasta un 3%, pero los motivos exactos de esta mejora son a día de hoy desconocidos (Laursen y Jenkins, 2002). Se especula sobre adaptaciones centrales (e.g., aumento del volumen plasmático y riego sanguíneo) y periféricas (e.g., mayor utilización de ácidos grasos, mayor actividad enzimática y buffer del ion H⁺). Sin embargo, son necesarios mayor número de estudios para aclarar esta cuestión.

La cuantificación del entrenamiento de resistencia se realiza comúnmente dividiendo el trabajo en 3 zonas de intensidad: Zona 1 (baja intensidad, por debajo del VT2), Zona 2 (intensidad moderada, entre el VT1 y VT2) y Zona 3 (alta intensidad, por encima del VT2) (Esteve-Lanao y col., 2007). Se conoce que los corredores de alto nivel llevan a cabo aproximadamente un 70, 20 y 10% del entrenamiento en Zona 1, Zona 2 y Zona 3, respectivamente (Esteve-Lanao, San Juan, Earnest, Foster y Lucia, 2005), e incluso algunos esquiadores de fondo o maratonianos realizan un entrenamiento todavía más polarizado (i.e., entrenamiento principalmente en Zonas 1 y 3), con un 75, 5 y 20%, respectivamente (Seiler y Kjerland, 2006). Esteve-Lanao y col. (2007) compararon 2 programas de entrenamiento en 12 corredores de fondo sub-élite durante 5 meses. El primero enfatizaba el trabajo en Zona 1 (80, 10 y 10%, respectivamente) y el segundo reducía el trabajo en Zona 1, aumentando la carga en Zona 2 (65, 25 y 10%, respectivamente). Los dos grupos mejoraron su rendimiento, pero la mejora fue mayor en el grupo que realizó más carga de entrenamiento en Zona 1. Se ha observado que una acumulación de gran volumen a intensidades bajas de entrenamiento (Zona 1) puede inducir a una aumento de la síntesis de proteínas mitocondriales, provocando una mayor disponibilidad energética y un menor estrés del sistema autónomo (Seiler y Kjerland, 2006). El trabajo en Zona 2, sin embargo, aunque resulta beneficioso para

corredores principiantes o no entrenados, es poco provechoso para corredores de cierto nivel (Esteve-Lanao y col., 2007), ya que se trata de un estímulo muy fatigante, que genera mucho estrés sobre el sistema simpático y puede conllevar al sobreentrenamiento (Esteve-Lanao y col., 2007; Muñoz y col., 2014).

Entrenamiento de fuerza

El entrenamiento de fuerza, por su parte, ha adquirido cada vez un papel más relevante dentro de los programas de entrenamiento, y a día de hoy, prácticamente todos los corredores de fondo cuentan con algún tipo de programa de fuerza dentro de su preparación. Existen numerosos estudios que han comprobado sus beneficios sobre el rendimiento (Tabla 1) (Berryman, Maurel y Bosquet, 2010; Karsten, Stevens, Colpus, Larumbe-Zabala, & Naclerio, 2015; Paavolainen, Häkkinen, Hämäläinen, Nummela y Rusko, 1999; Spurrs, Murphy y Watsford, 2003; Støren, Helgerud, Stoa y Hoff, 2008). Se han encontrado mejoras en el rendimiento en pruebas de 3-5 km (Berryman y col., 2010; Karsten y col., 2015; Paavolainen y col., 1999; Spurrs y col., 2003), el tiempo hasta el agotamiento (Støren y col., 2008), economía de carrera (Berryman y col., 2010; Piacentini y col., 2013; Støren y col., 2008), velocidad en el $VO_{2\text{max}}$ (Berryman y col., 2010; Taipale, Mikkola, Vesterinen, Nummela y Häkkinen, 2013), velocidad en el umbral anaeróbico (Taipale y col., 2013) y velocidad anaeróbica máxima (Paavolainen y col., 1999). Estas mejoras fueron propiciadas por adaptaciones neuromusculares como el aumento del stiffness muscular, reclutamiento y sincronización de unidades motoras y coordinación intra- e inter-muscular (Beattie y col., 2014).

Tabla 1. Comparación de programas de entrenamiento de fuerza para la mejora del rendimiento en carreras de fondo.

Estudio	Sujetos	Volumen	Frecuencia/ Duración	Test rendimiento	Mejora
Berryman y col. (2010)	12 hombres corredores nivel medio	F_{max} : 3-8 series de 8 rep (squats) (95% P_{max})	1 día/sem; 8 sem	3 km	4.2%
	11 hombres corredores nivel medio	Pliometría: 3-8 series de 8 rep (drops) (95% altura max)	1 día/sem; 8 sem	3 km	4.9%
Karsten y col. (2015)	8 hombres corredores nivel medio	4 series de 4 rep al 80% 1 RM	2 días/sem; 6 sem	5 km	3.6%
Paavolainen y col. (1999)	10 hombres corredores nivel élite cross	Fexplosiva: sprints 5-10 series de 20-100 m + saltos con/sin carga + 5-20 rep flexo-ext rodilla a max velocidad	32% volumen entrenamiento total; 9 sem	5 km	3.6%
Spurrs y col. (2003)	8 hombres corredores nivel medio	Pliometría: 60-180 saltos/ rebotes/hops horizontales/ verticales (Min tiempo contacto)	2-3 días/sem; 6 sem	3 km	2.7%
Støren y col. (2008)	4 hombres y 4 mujeres corredores entrenados	4 series de 4 RM en media sentadilla	3 días/sem; 8 sem	Tiempo en VAM	21.3%

Nota: F_{max} : fuerza máxima; P_{max} : potencia máxima; rep: repetición; sem: semana; altura max: altura máxima; Fexplosiva: fuerza explosiva; VAM: velocidad aeróbica máxima.

No obstante, ser más fuerte no necesariamente garantiza un mejor rendimiento (Støren y col., 2011), sino que es la intervención a través de la fuerza la que aporta beneficio. Se habla principalmente de 3 tipos de entrenamiento de fuerza para la mejora del rendimiento en las carreras de fondo: 1- Fuerza máxima (70-90 % de 1 RM y pocas repeticiones), 2- Fuerza explosiva (30-60% de 1 RM a alta velocidad de ejecución) y 3- Fuerza reactiva o pliometría (contracciones excéntricas seguidas de rápidas contracciones concéntricas) (Beattie, Kenny, Lyons y Carson, 2014). En corredores que se inician en el entrenamiento de fuerza y con un objetivo de mejora a largo plazo se proponen programas de fuerza genéricos (e.g., circuitos) o de fuerza máxima e incluir, si se desea, alguna sesión de fuerza reactiva de poco volumen (i.e., progresiones de pliometría básica) (Beattie y col., 2014). Por el contrario, corredores

bien entrenados en este tipo de entrenamientos tendrían que decantarse por un trabajo más específico de fuerza explosiva y reactiva.

La periodización de este tipo de entrenamiento todavía no ha sido estudiada en profundidad. El periodo de intervención mínimo para observar mejoras en el rendimiento parece estar comprendido entre las 6-8 semanas (Tabla 1) y por lo general, se lleva a cabo de manera concurrente con el entrenamiento de resistencia. Sin embargo, un reciente meta-análisis (Beattie y col., 2014) recoge que este entrenamiento concurrente es una intervención muy potente para la mejora del rendimiento en corredores de bajo y medio nivel, pero pocos son los estudios que han analizado su efecto en corredores de alto nivel. Todo parece indicar que estos corredores también se ven favorecidos por este tipo de entrenamiento concurrente (Sedano y col., 2013; Yamamoto y col., 2008), aunque algunos autores (Beattie y col, 2014) discuten sobre los posibles efectos adversos debido a las diferentes demandas de cada actividad.

Entrenamiento en ambientes calurosos

El entrenamiento en ambientes calurosos, tal y como se ha comentado anteriormente, afecta al rendimiento y a la economía de carrera a partir de una temperatura ambiente de 15°C. La aclimatación a estos ambientes (i.e., exposición a episodios agudos y crónicos de ejercicio en ambientes calurosos) posibilita al corredor mantenerse en una temperatura corporal más baja y aumentar el volumen plasmático, pudiendo atenuar la magnitud de la respuesta termorreguladora (i.e., ventilación, circulación y sudoración aumentadas) (Hue, 2011; Svedenhag, 2000). Esta adaptación permitirá a los corredores a su vez, ir a una velocidad de carrera determinada con una menor frecuencia cardiaca y una menor temperatura corporal (Hue, 2011). Algunos autores (Nielsen y col., 1993) observaron un aumento significativo del tiempo hasta el agotamiento tras una aclimatación de 9-12 días a una temperatura ambiente muy elevada (40°C) y poca humedad (10%). Cuando la temperatura y la humedad son ambas elevadas, la aclimatación resulta más difícil ya que la evaporación se ve limitada (Nielsen, Søren, Christensen, Warberg y Saltin, 1997). No obstante, hay autores que han observado que tras la aclimatación de 8 días a estos ambientes tropicales (33.4°C y 75.5% de humedad) el rendimiento respecto al test realizado el segundo día de exposición puede mejorar un 3% (Hue y col., 2004). En conclusión, aunque el rendimiento se vea mejorado tras la aclimatación/entrenamiento en ambientes calurosos, todo parece indicar que es muy difícil conseguir una aclimatación completa y obtener el mismo rendimiento que se obtendría en condiciones ambientales normales (Hue y col., 2004 y 2011).

Entrenamiento en altura

El entrenamiento en altura es una estrategia que se lleva utilizando 40-50 años tanto para preparar las competiciones celebradas en altura, como para mejorar el rendimiento a nivel del mar. El concepto clásico fue vivir y entrenar a una altura moderada (1800-2500 m) durante 2-4 semanas (i.e., “*live high-train high*”), pero algunos estudios mostraron que sólo era efectivo para mejorar el rendimiento en altura y no a nivel de mar, al menos en deportistas de élite (Burtscher, Gatterer, Faulhaber, Gerstgrasser y Schenk, 2010; Wilber, 2011). Así, en la década de los 90, se desarrolló el modelo de “*live high-train low*” (i.e., vivir arriba y entrenar abajo), para evitar los efectos negativos de entrenar en hipoxia (e.g., pérdida de masa muscular y fatiga), pero consiguiendo los efectos deseados por la aclimatación (Burtcher y col., 2010; Wilber, 2011). Todo parece indicar que este método de entrenamiento conlleva mejoras sustanciales como un aumento del VO_{2max}, masa de la hemoglobina, economía de carrera y rendimiento tras la exposición a la altura (un 1.1% de mejora en el rendimiento tras 27 días de exposición a 2500 m) (Tabla 2) (Humberstone-Gough y col., 2013; Stray-

Gundersen, Chapman y Levine, 2001; Saugy y col., 2014; Wehrlin, Zuest, Hallén y Martí, 2006; Wilber, 2011). No obstante, este tipo de entrenamiento (i.e., “*live high-train low*”) requiere una localización estratégica del corredor, vivir en un lugar que le permita viajar diariamente entre altitudes, algo logística y financieramente costoso (Humberstone-Gough y col., 2013). Como alternativa, se ha propuesto la exposición aguda o intermitente a la hipoxia (i.e., “*live low-train high*”). Este protocolo consiste principalmente en someter al atleta a intervalos de segundos u horas de hipoxia (i.e., hipoxia simulada con un respirador que introduce una presión parcial de oxígeno similar a la de la altura) repetidos varias veces a la semana, bien en reposo (i.e., “*intermittent hypoxic exposure*”) o durante el ejercicio (i.e., “*intermittent hypoxic training*”) (Hendriksen y Meeuwsen, 2003; Humberstone-Gough y col., 2013; Katayama, Matsuo, Ishida y Miyamura, 2003; Wilber, 2011). Muy pocos estudios que lo han analizado muestran mejoras en el rendimiento (Tabla 2) (Millet, Roels, Schmitt, Woorons y Richalet, 2010), y su utilización se recomienda principalmente de cara a una aclimatación previa a la competición en altura o a una estancia de entrenamiento (Wilber, 2011).

Más recientemente se han propuesto otros métodos como pueden ser el entrenamiento interválico en hipoxia (i.e., “*intermittent hypoxic interval training*”), que añadiría a los efectos del anteriormente comentado entrenamiento interválico las ventajas de la hipoxia (Millet et al., 2010). Este entrenamiento consiste en realizar los esfuerzos en normoxia e introducir la hipoxia en los períodos de descanso del entrenamiento, para así estimular la eritropoyesis. Hasta la fecha, la mayoría de estudios que se han realizado han sido en deportes de equipo (e.g., baloncesto) o personas con problemas de salud (e.g., diabéticos) por lo que es difícil obtener conclusiones para deportes de resistencia. En el caso de ciclistas y triatletas bien entrenados, Roels y col. (2015) observaron que las mejoras tras 4 semanas de entrenamiento interválico en hipoxia eran muy similares a las obtenidas tras el entrenamiento intermitente en hipoxia o normoxia (Tabla 2). Por lo tanto, son necesarios estudios realizados con corredores de fondo.

Tabla 2. Comparación de las mejoras producidas por distintos programas de entrenamiento en altura.

	Tipo entrenamiento altura	Estudio	Sujetos	Duración y dosis altura	Mejoras
Live high-train low	Humberstone-Gough y col. (2013)	5 hombres y 2 mujeres triatletas selección nacional	17 días Entrenamiento: ~ 600 m Vida diaria: 14 h/día simulación de 3000 m (tienda)	EC ↑ 4.6%; VO _{2max} ↑ 0.4%; vVO _{2max} ↑ 1.6%	
		14 hombres triatletas bien entrenados	18 días Entrenamiento: 1100-1200 m Vida diaria: 2250 m hipoxia simulada (tienda)	Test 3000 m no cambios; VO _{2max} ↑ 6.1%; P _{max} ↑ 9.6%	
	Saugy y col. (2014)	13 hombres triatletas bien entrenados	18 días Entrenamiento: 1100-1200 m Vida diaria: 2250 m real	Test 3000 m no cambios pero sí ↑ 3.3% 21 días después de la vuelta; VO _{2max} ↑ 5.2%; P _{max} ↑ 6.6%	
		14 hombres y 8 mujeres corredores 1500-maratón nivel selección nacional	27 días Entrenamiento: 1250 m Vida diaria: 2500 m	Test 3000 m ↑ 1.1%; VO _{2max} ↑ 3%	
	Wehrlin y col. (2006)	5 hombres y 5 mujeres nivel nacional orientación	24 días Entrenamiento: 1000-1800 m Vida diaria: 18 h/día a 2456 m	Test 5000 m ↑ 1.6%; VO _{2max} ↑ 4.1%	
Live low-train high Intermittent hypoxic training	Hendriksen y Meeuwsen (2003)	16 hombres triatletas	10 días Entrenamiento: 2 h/día a altitud simulada de 2500 m Vida diaria: 0 m	P _{max} ↑ 5.2%; Panaeróbica ↑ 4.1%; VO _{2max} no cambios	

Live low-train high <i>Intermittent hypoxic exposure</i>	Katayama y col. (2003)	6 hombres corredores de larga distancia nivel universitario	21 días Entrenamiento: usuales a 0 m + 90 min 3 días/sem a 4500 m altitud simulada durante el descanso Vida diaria: 0 m	Test 3000 m ↑ 1.4%; VO _{2max} no cambios; EC ↑; tiempo hasta agotamiento ↑ 9.1 %
Live low-train high <i>Intermittent hypoxic interval training</i>	Roels y col. (2005)	11 hombres ciclistas y triatletas	35 días Entrenamiento: 2 sesiones/sem entrenamiento intervalíco al 90-100% P_{max} (cicloergómetro), hipoxia durante calentamiento, descanso y vuelta a la calma	Pmedia ↑ 5.2%; VO _{2max} ↑ 8.7%; eficiencia no cambios

Nota: EC: economía de carrera; VO_{2max}: consumo máximo de oxígeno; vVO_{2max}: velocidad en el consumo máximo de oxígeno; P_{max} : potencia máxima; Panaeróbica: potencia anaeróbica; EC: economía de carrera; Pmedia: potencia media.

Factores fisiológicos

Los factores fisiológicos (VO_{2max}, umbral ventilatorio 2, economía de carrera, edad, género, tipos de fibras musculares, fatiga y raza) que afectan al rendimiento de las carreras de fondo han sido durante muchos años los factores más estudiados por la literatura científica.

Consumo máximo de oxígeno (VO_{2max})

El consumo máximo de oxígeno se define como la cantidad máxima de oxígeno que el organismo puede absorber, transportar y consumir por unidad de tiempo (Ferrero y Fernández, 2001). Normalmente se expresa relativo al peso corporal del sujeto (ml·kg⁻¹·min⁻¹) y depende fundamentalmente de componentes genéticos (~70%) y del entrenamiento (~30%) (Ferrero y Fernández, 2001). Es una variable relacionada con la capacidad aeróbica y está muy vinculada al rendimiento en carreras de fondo, conociéndose que a mayor VO_{2max}, mayor rendimiento (McArdle, Katch y Katch, 2004). Los valores típicos para personas sanas oscilan entre los 35-45 ml·kg⁻¹·min⁻¹, mientras que los deportistas de resistencia (esquiadores, corredores, ciclistas...) pueden llegar a alcanzar 60-80 ml·kg⁻¹·min⁻¹ (McArdle y col., 2004). Tradicionalmente, se ha venido utilizando casi como el único parámetro fisiológico determinante de las carreras de fondo (Bosquet, Leger y Legros, 2002). Sin embargo, cuando se comparan corredores de alto nivel con valores de VO_{2max} elevados y homogéneos, se ha observado que la correlación del VO_{2max} con el rendimiento es baja (Bosquet y col., 2002) y deja de ser un parámetro discriminativo del nivel de rendimiento.

Umbral ventilatorio 2

El umbral ventilatorio 2 (VT2) hace referencia a la máxima intensidad de esfuerzo que un sujeto puede mantener de manera prolongada en el tiempo. Esta variable tiende a tomarse como una medida representativa del nivel de entrenamiento aeróbico y se ha observado que se encuentra en deportistas de fondo entrenados alrededor del 80-90% del VO_{2max} (López, Calvo y Fernández, 2001). Algunos estudios observaron una mayor correlación entre el VT2 y el rendimiento en 5-10 km que con el VO_{2max} (Kumagai y col., 1982). Así, un deportista que presente un VT2 más alto, podrá mantener en el tiempo una velocidad de carrera más elevada que otro corredor, y posiblemente obtenga un mayor rendimiento. Este umbral es, a su vez, dependiente de la economía de carrera. Una mejora de ésta provoca una mejora del umbral anaeróbico (Bosquet y col., 2002).

Economía de carrera

La economía de carrera es comúnmente definida como “*el gasto energético o VO_2 consumido a una velocidad de carrera determinada*” (Saunders y col., 2004), conociéndose que los sujetos entrenados son más económicos que los no entrenados (de Ruiter, Verdijk, Werker, Zuidema y de Hann, 2013; Svedenhag, 2000). Aunque realmente hace referencia a una tasa de consumo de oxígeno en $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$, comúnmente se utiliza el valor en $ml \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$ para evitar la influencia de la velocidad absoluta de la carrera (Lucía y col., 2006). Los valores típicos para atletas altamente entrenados oscilan entre $175-220 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ (Lucía y col., 2006), mientras que en otras poblaciones de deportistas (e.g., futbolistas) los valores son claramente superiores a $220 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ (Impellizzeri y col., 2006). Así, los corredores con una mejor economía de carrera presentan un menor consumo de oxígeno a la misma velocidad (Saunders y col., 2004), y justifica, en gran medida, su mayor rendimiento en las carreras de fondo y medio fondo. Puesto que muchas veces estos valores no parecen ser suficientemente discriminativos entre poblaciones muy similares, los últimos estudios sobre medición de la economía de carrera (Shaw, Ingham y Folland, 2014), proponen expresarla en $kcal \cdot kg^{-1} \cdot km^{-1}$, teniendo así en cuenta el cociente respiratorio, y por tanto, la contribución anaeróbica al esfuerzo.

Por otro lado, algunos autores han propuesto relacionar el $VO_{2\max}$ y la economía de carrera mediante un coeficiente que pone en relación la máxima energía disponible y la energía gastada para desplazar la masa corporal (i.e., $VO_{2\max}$ entre la economía de carrera), observándose una fuerte correlación positiva con el rendimiento (Støren, Helgerud y Hoff, 2011). Actualmente también se discute sobre el verdadero papel de la economía de carrera en el rendimiento, en tanto que, como se ha comentado anteriormente y al igual que pasaba con el $VO_{2\max}$, en grupos homogéneos de corredores no ha sido una variable discriminante del mismo (Mooses y col., 2015). Es posible que ambas variables ($VO_{2\max}$ y economía de carrera) estén inversamente relacionadas (Sawyer y col., 2010), y que los atletas con menor $VO_{2\max}$ lo puedan compensar con una mejor economía. También existe controversia sobre la influencia de la distancia de competición en la economía de carrera, y mientras algunos autores abogan por una mejor economía de los corredores de larga distancia en comparación con los de media distancia (Daniels y Daniels, 1992), otros muestran lo contrario (Rabadán y col., 2011). Todo parece indicar que es la velocidad específica de cada especialidad la más económica para cada corredor (Daniels y Daniels, 1992), aunque también es posible que los sistemas de entrenamiento utilizados por ambos grupos de corredores (larga vs. media distancia) no sean tan diferentes, al menos, en la época en que las evaluaciones han sido llevadas a cabo (i.e., periodo preparatorio).

Edad

La edad es otro factor a tener en cuenta a la hora de obtener un óptimo rendimiento. En general, se observa que los mayores logros o las mejores marcas en carreras de fondo se obtienen entre los 30-40 años (Hunter y Stevens, 2013; Sterken, 2001). Es en esta franja de edad, donde se produce un equilibrio óptimo entre las variables $VO_{2\max}$, fuerza muscular y economía de carrera. Se ha descrito que el $VO_{2\max}$ aumenta hasta aproximadamente los 20 años y posteriormente va disminuyendo progresivamente menos de un 1% al año, prácticamente de la misma manera que la fuerza muscular, la cual consigue su desarrollo óptimo entre los 20-30 años, y va disminuyendo en la mayoría de grupos musculares por descenso de la masa muscular (McArdle y col., 2004). Sin embargo, se ha observado que la economía de carrera va mejorando con la edad (Midgley, McNaughton y Jones, 2007). Teniendo en cuenta lo anterior, uno de los objetivos del entrenamiento en personas de mayor edad sería incidir en las capacidades que más van a verse afectadas con el paso de los años.

Un buen trabajo de fuerza y el entrenamiento de resistencia de alta intensidad harán que este detrimiento sea menor y que incluso puedan mantenerse hasta los 70 años tiempos muy aceptables en una maratón (e.g., pérdidas de ritmo de competición de tan sólo $1 \text{ min} \cdot \text{km}^{-1}$) (Trappe, 2007).

Género

El género también tiene una clara influencia en el rendimiento de las carreras de fondo. Por ejemplo, en los últimos JJOO de Londres 2012, el ganador masculino de la maratón (Stephen Kiprotich, UGA) consiguió un tiempo de 2:08:01 hh:mm:ss, mientras que la ganadora (Tiki Gelana, ETH) necesitó aproximadamente 15 min más para finalizarla (2:23:07 hh:mm:ss). En los 10 km, el ganador (Mohamed Farah, GBR) obtuvo un tiempo de 27:30 mm:ss y la ganadora femenina (Tirunesh Dibaba, ETH) 30:20 mm:ss, siendo la diferencia de ~ 3 min (Olympic.org, s.f.). Se trata de diferencias de $\sim 10\%$, que se corresponde a su vez, con el 12% de diferencia observada entre los 10 mejores clasificados hombres y mujeres en la maratón de Nueva York entre 2006-2010 (Hunter y Stevens, 2013). Una posible explicación podría residir en los menores valores de fuerza y $\text{VO}_{2\text{max}}$ que presentan las mujeres frente a los hombres (McArdle y col., 2004). Los hombres muestran $\sim 20\text{-}25\%$ mayor $\text{VO}_{2\text{max}}$ que las mujeres a cualquier edad (McArdle y col., 2004), principalmente debido a su mayor masa muscular y otros condicionantes genéticos, hormonales e incluso a la menor cantidad de hemoglobina de las mujeres debido a los ciclos menstruales (Ferrero y Fernández, 2001). Sin embargo, la influencia del género en la economía de carrera es todavía difusa. Mientras algunos autores (Morgan y Craib, 1992) se posicionan en que el hombre es más económico que la mujer, otros no han encontrado diferencias significativas a similares intensidades relativas (Daniels y Daniels, 1992; Kyrolainen, Belli y Komi, 2001). Por el contrario, algunos trabajos indican que la mujer es más económica (Helgerud, Støren y Hoff, 2010), al presentar normalmente un menor índice de masa corporal y necesitando así menor energía para correr a la misma velocidad.

Tipos fibras musculares

La distribución de los tipos de fibras musculares dentro del músculo varía como consecuencia del entrenamiento físico y la especificidad del mismo (Ferrero y Fernández, 2001). Se han estudiado las diferencias existentes entre velocistas, medio fondistas y fondistas en los tipos de fibras musculares del vasto lateral (Svedenhag, 2000) y se ha observado que los fondistas presentan un 75% de fibras tipo I (de contracción lenta) y un 25% de fibras tipo IIa (de contracción intermedia), siendo un porcentaje muy pequeño o incluso nulo el de fibras tipo IIb (de contracción rápida). Este predominio de fibras musculares tipo I parece estar relacionado con el $\text{VO}_{2\text{max}}$ (Saunders y col., 2004) y la economía de carrera (Williams y Cavanagh, 1987). Un mayor porcentaje de fibras lentas tienden a producir menor cantidad de lactato y un menor gasto energético (Williams y Cavanagh, 1987), obteniéndose como consecuencia un mejor rendimiento en las carreras de fondo (Saunders y col., 2004).

Fatiga

La fatiga también repercute en el rendimiento del corredor. Con el paso de los kilómetros en una maratón, incluso cuando el ritmo de carrera es óptimo y constante, se van produciendo una serie de modificaciones fisiológicas (e.g., acidosis, alteración iónica, agotamiento eventual del glucógeno) que dificultan el mantenimiento de la misma intensidad de esfuerzo (Coyle, 2007). Además, tras un ejercicio extenuante (al final de una maratón y/o después del tramo de bici en un triatlón) la economía de carrera se ve perjudicada entre un 2-11% respecto a la carrera control (Hue, Le Gallais, Chollet, Boussana y Prefaut, 1998). Algunos autores (Bernard y col., 2003) han comprobado que este detrimiento se debe al deterioro de

parámetros fisiológicos como el aumento de la frecuencia cardiaca y de la ventilación, y se ha descrito que la capacidad para aumentar el tiempo hasta el agotamiento depende de factores como la economía de carrera, el $VO_{2\text{max}}$ y la potencia del tren inferior (Bertuzzi y col., 2012). Otros autores asocian esta fatiga con el deterioro de parámetros biomecánicos como la alteración cinemática o en la coordinación (Hausswirth, Bigard y Gueennec, 1997; Larson y col., 2011). Así, por ejemplo, Hausswirth y col. (1997), vieron cómo durante los últimos 45 min de una maratón la economía de carrera disminuía, y la atribuían, en cierta medida, a una mayor inclinación del tronco hacia delante, un aumento de la frecuencia y una disminución de la amplitud de zancada. Sin embargo, otros autores no observaron alteración cinemática ninguna (Hue y col., 1998). Todo parece indicar que el nivel de entrenamiento tiene una gran influencia sobre las alteraciones asociadas con la fatiga, de ahí que estos cambios sean mucho más apreciables en los corredores de menor nivel (Hue y col., 1998).

Raza

La influencia de la raza en el rendimiento es uno de los factores más discutidos desde que los corredores africanos han dominado todas las pruebas de fondo (i.e., desde los 3000 m obstáculos hasta la maratón) de las grandes citas y eventos deportivos. Esto ha provocado un aumento de las investigaciones científicas, las cuales han abordado esta supremacía desde diferentes puntos de vista, para intentar darle una respuesta. Por un lado, no se han encontrado diferencias significativas entre corredores caucásicos y africanos en la distribución de fibras musculares o en el $VO_{2\text{max}}$ (Lucia y col., 2006; Saltin y col., 1995), e incluso los corredores de origen caucásico han tendido a presentar mayores valores de $VO_{2\text{max}}$ (Lucia y col., 2006; Weston, Mbambo y Myburgh, 2000). Sin embargo, se ha demostrado que los corredores eritreos/keniatas presentan claramente una economía de carrera un 5-14% mejor (Lucia y col., 2006; Weston y col., 2000). Además, a esto se le une un bajo peso, índice de masa corporal, constitución de piernas finas con la masa más cerca de la cadera y un menor momento de fuerza del tendón de Aquiles, lo que les favorece en su rendimiento (Lucia y col., 2006; Mooses y col., 2015; Saltin y col., 1995). No debemos olvidar que los factores ambientales y sociales juegan también un papel muy importante. Muchos de los corredores africanos proceden de la misma zona geográfica (Valle del Rift), y normalmente viven y entran en altura (Etiopía > 2000 m, Kenia ~ 2000 m y Eritrea ~ 2600 m). A su vez, se ha observado que durante la niñez realizan más actividad física que los europeos, debido principalmente a las tareas domésticas que tienen que realizar (Larsen, Christensen, Nolan y Søndergaard, 2004). De otra parte, los entrenamientos de estos corredores africanos se caracterizan por ser de mayor intensidad y menor volumen que los de los corredores europeos. Por último, y quizás el factor más importante, sea el afán de salir de la pobreza mediante el deporte de élite, lo que hace posible que el número de practicantes y el nivel de rendimiento de los corredores africanos sea mayor (Lucia y col., 2006; Mooses y col., 2015). A día de hoy, son necesarios mayor número de estudios para dar respuesta a este complejo fenómeno.

Factores biomecánicos

Diversos autores han destacado la importancia de la biomecánica de la carrera en el rendimiento en las carreras de fondo (Kyrolainen y col., 2001; Nummela, Keranen y Mikkelsson, 2007). No obstante, existe un gran desconocimiento sobre la verdadera influencia de alguno de estos factores (Kyrolainen y col., 2001; McCann y Higginson, 2008; Ogueta-Alday, Rodríguez-Marroyo y García-López, 2014), muchas veces asociado a las grandes dificultades para su registro, así como por la gran complejidad e interrelación entre todos ellos.

Antropometría

Diferentes estudios han comprobado que dentro de las características antropométricas, un bajo peso, índice de masa corporal, porcentaje de masa grasa y sumatorio de pliegues cutáneos son esenciales para conseguir una buena economía de carrera (McCann y Higginson, 2008; Støren y col., 2011) y un óptimo rendimiento (Knechtle, Duff, Welzel y Kohler, 2009). Por otro lado, los corredores de fondo y medio fondo se han caracterizado durante muchos años por ser de baja estatura (Foster y Lucia, 2007). Sin embargo, a día de hoy su importancia no es tan clara. Aunque algunos estudios han observado una relación inversa entre la estatura y la economía de carrera (Støren y col., 2011), otros no han observado relación ninguna con el rendimiento (Knechtle, Knechtle y Rosemann, 2010). También se ha discutido que unas extremidades inferiores más largas podrían resultar en una carrera más eficiente (Lucia y col., 2006; Steudel-Numbers, Weaver y Wall-Scheffler, 2007). No obstante, más que las dimensiones en longitud, es la masa y la distribución de la misma lo que muestra una mayor influencia (Foster y Lucia, 2007; Steudel-Numbers y col., 2007). Una masa más próxima al eje de rotación principal de las extremidades inferiores (i.e., articulación de la cadera), podría ser sinónimo de una mayor economía de carrera. Lucia y col. (2006) observaron que los corredores eritreos presentaban mejores economías de carrera que los españoles, con diferencias significativas y valores más bajos en índice de masa corporal, sumatorio de pliegues cutáneos y perímetros de gemelo y tobillo. Así, las características antropométricas relacionadas principalmente con la masa corporal, parecen ser las que mayor influencia presentan sobre el rendimiento. De acuerdo con los resultados de Lucía y col. (2006), un corredor de fondo de raza caucásica tendría muchas dificultades para disminuir su índice de masa corporal por debajo de $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ y el sumatorio de 6 pliegues cutáneos por debajo de 30 mm, mientras que esto es habitual en los corredores africanos.

Leg-stiffness

La rigidez de las piernas o también llamado “*leg-stiffness*” es otro parámetro biomecánico relacionado con el rendimiento. Durante la carrera, los principales músculos extensores de las articulaciones del tobillo y la rodilla (i.e., tríceps sural y cuádriceps, respectivamente) contribuyen en más de un 70% al trabajo mecánico total realizado (Sasaki y Neptune, 2006). En este complejo mecanismo, músculo y tendón deben ser considerados como una unidad de transmisión de energía (Dumke, Pfaffenroth, McBride y McCauley, 2010), y si los convertimos en un modelo de muelles (i.e., “*spring-mass model*”), se puede decir que el “*leg-stiffness*” de las piernas es la relación entre la fuerza máxima aplicada al “muelle” (i.e., la máxima fuerza aplicada contra el suelo) y la máxima compresión del mismo (i.e., el descenso del centro de gravedad) (Morin, Samozino, Zameziati y Belli, 2007). La energía almacenada en estos “muelles” podría disminuir la activación muscular y el gasto energético que ésta conlleva, dentro de una limitación temporal, ya que el sistema muscular de los seres vivos es viscoelástico, y no puramente elástico. Así, se conoce que existe una relación positiva entre el “*leg-stiffness*”, la economía de carrera y el rendimiento. Igualmente, determinados métodos de entrenamiento de fuerza (i.e., fuerza máxima y pliometría) van dirigidos a la mejora de alguno de los componentes del “*leg-stiffness*” (i.e., la fuerza aplicada al correr o la rigidez del sistema a ser deformado).

Flexibilidad

La flexibilidad, entendida como la capacidad del sistema muscular para ser deformado, es otro aspecto a analizar, por su relación directa con el “*leg-stiffness*”. Una menor flexibilidad en las articulaciones de cadera y tobillo muestra una influencia positiva sobre la economía de

carrera, ya que hace que la energía elástica retorne con mayor facilidad (Craib, Mitchell y Fields, 1996). Por creencia popular y rutina, muchos corredores y entrenadores apuestan por estirar antes y después del ejercicio para prevenir lesiones y mejorar el rendimiento. Sin embargo, a día de hoy estos dos objetivos siguen sin estar probados científicamente (Fields, Sykes, Walker y Jackson, 2010). Mientras algunos autores han observado que tras la realización de 16 min de estiramientos estáticos previos al ejercicio la capacidad de hacer fuerza del músculo se reduce, empeorando la economía de carrera al 65% del $VO_{2\text{max}}$ y el rendimiento en un test de 30 minutos de carrera (Wilson y col., 2010), otros no han observado deterioros (Hayes y Walker, 2007). De esta manera, y ante la disparidad de criterios, Saunders y col. (2004) concluyen diciendo que los corredores de fondo deberían seguir trabajando la flexibilidad para no limitar la amplitud de zancada a altas velocidades de carrera, sin restar a su vez importancia al cierto grado de rigidez necesario para el óptimo rendimiento en las carreras de fondo.

Patrón de pisada

El patrón de pisada o la manera en la que el corredor contacta con el suelo es otro parámetro biomecánico a tener en cuenta. Tradicionalmente se identifican 3 patrones: 1- talonador, en el que el contacto inicial del pie en el suelo se hace con el talón o la parte posterior del pie; 2- planta entera, en el que el talón y la parte anterior del pie contactan de forma simultánea; 3- antepié, en donde la primera mitad del pie realiza el contacto inicial con el suelo (Hasegawa, Yamauchi y Kramer, 2007). Lieberman y col. (2010) se posicionan en que el patrón de pisada natural del hombre antes de la aparición del calzado deportivo, fue el de planta entera o antepié, y que ha sido la aparición del acolchado (i.e., calzado de amortiguación) y la elevación de la zona del talón (i.e., “*drop*”) lo que ha llevado al ser humano a utilizar un patrón de pisada talonador. Desde su punto de vista, el patrón de pisada más adelantado guarda menos relación con la aparición de lesiones, si bien varios son los trabajos que contradicen estos hallazgos (Stearne, Alderson, Green, Donnelly y Rubenson, 2014), y sencillamente se trata de un cambio en la tipología de lesiones. Es decir, el apoyo retrasado se vincula a más estrés en zonas tibial, lumbar y rótulas, mientras que en el apoyo adelantado el estrés aumenta en tríceps sural, fascia plantar y metatarsos.

Se conoce, que a día de hoy, el ~ 97% de corredores que empiezan a correr adoptan un patrón de pisada talonador (Bertelsen, Jensen, Nielsen, Nielsen y Rasmussen, 2013), posiblemente por su mayor parecido con el mecanismo de la marcha humana. En una media maratón en la que participaron atletas de mayor nivel, se vio que el 78, 20 y 2% adoptaba un patrón talonador, de planta entera y antepié, respectivamente (Hasegawa y col., 2007). Estos porcentajes se van incrementando en carreras de mayor distancia, como es una maratón (94, 5 y 1%, respectivamente) (Kasmer, Liu, Roberts y Valadao, 2013), siendo dependientes del momento en el que se registran (i.e., 88% de corredores talonadores en el kilómetro 10 y 93% en el kilómetro 32) (Larson y col., 2011). Por contra, en las carreras de medio-fondo (i.e., 800 y 1500 m) los porcentajes se invierten, observándose un 31, 42 y 27%, respectivamente (Hayes y Caplan, 2012) (Figura 2).

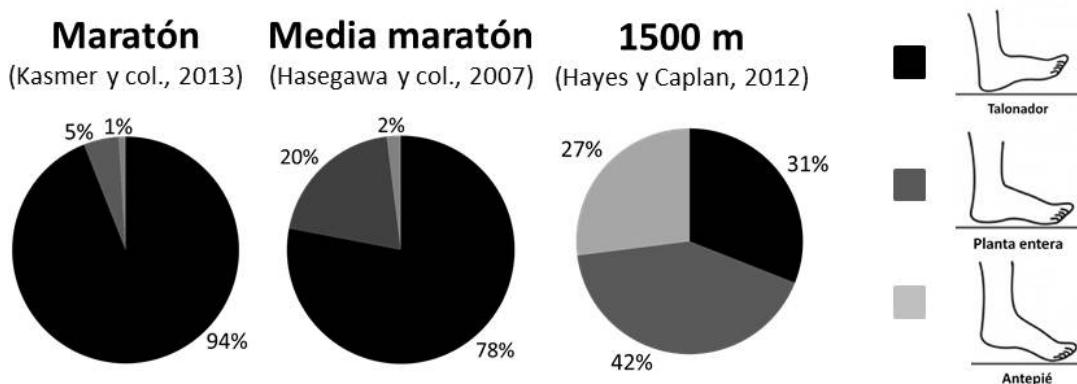


Figura 2. Porcentaje de corredores talonadores, planta entera y antepié en carreras de diferentes distancias.

Por otro lado, existe controversia sobre la influencia del patrón de pisada en el rendimiento de la carrera, mostrándose resultados contradictorios (Kasmer y col., 2013; Larson y col., 2011). Mientras algunos observaron un menor porcentaje de corredores talonadores entre los atletas mejor clasificados (Hasegawa y col., 2007; Kasmer y col., 2013), otros no observaron esta tendencia (Larson y col., 2011). Algunos autores han comentado que los patrones de planta entera y antepié posibilitan un mejor estiramiento del arco del pie y un mayor aprovechamiento de la energía elástica de las extremidades inferiores durante la primera parte del contacto con el suelo (Perl, Daoud y Lieberman, 2012). Estos corredores presentan un menor tiempo de contacto en el suelo (Di Michele y Merni, 2014; Gruber, Umberger, Braun y Hamill, 2013; Ogueta-Alday, Morante, Rodríguez-Marroyo y García-López, 2013a; Ogueta-Alday y col., 2014), lo que provoca un aumento del “*leg-stiffness*” e hipotéticamente una mejor economía de carrera (Dumke y col., 2010). Sin embargo, algunos estudios demostraron que cambiar el patrón de pisada (de talonador a antepié y viceversa) no tenía ningún efecto agudo sobre la economía de carrera (Ardigò, Lafortuna, Minetti, Mognoni y Saibene, 1995; Cunningham, Schilling, Anders y Carrier, 2010; Perl y col., 2012). Además, estudios que compararon el patrón de pisada natural de los corredores observaron una tendencia de los corredores talonadores a ser más económicos a velocidades de carrera submáximas (Gruber y col., 2013; Ogueta-Alday y col., 2014). No obstante, para la consecución de ritmos de carrera más elevados (i.e., superiores a los $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), propios de los corredores de mayor nivel o media distancia, un patrón de pisada adelantado podría permitir obtener un menor tiempo de contacto y por tanto, facilitar la consecución de velocidades altas. A día de hoy se desconocen los mecanismo intrínsecos (e.g., estructura del pie) y/o extrínsecos (e.g., entrenamiento) que llevan a utilizar un patrón de pisada u otro de manera natural. Hatala, Dingwall, Wunderlich y Richmond (2013) sugieren que la velocidad y distancia de carrera, al igual que el nivel y la frecuencia de entrenamiento podrían ser algunas de las causas.

Calzado

A parte de la posible influencia del uso del calzado en el patrón de pisada, y de éste en el rendimiento, un tópico bastante estudiado es su influencia en el rendimiento. La zapatilla es una masa periférica alejada de los principales ejes de rotación de las extremidades inferiores (i.e., articulaciones de la cadera y rodilla) lo que hace aumentar el gasto energético (Divert y col., 2008). Se ha establecido un deterioro de la economía de carrera entre 2-6% al utilizar calzado respecto a correr descalzo a una intensidad del 70% del $\text{VO}_{2\text{max}}$ (Hanson, Berg, Deka, Meendering y Ryan, 2011). Además, otros estudios han confirmado que por cada 100 gr de peso extra en cada pie, la economía de carrera se deteriora un 1% (Franz, Wierzbinski y Kram, 2012). Por el contrario, una mayor rigidez del calzado provoca un aumento del “*leg-stiffness*” y conlleva una mejora de hasta un 1% en la economía de carrera,

fundamentalmente en personas con mayor masa corporal (Roy y Stefanyshyn, 2006). Por tanto, no es de extrañar que los corredores escojan zapatillas más ligeras y rígidas para competir que para entrenar.

En 2009 surgió una nueva tendencia que aboga por correr descalzo (i.e., “*barefoot running*”) o con calzado minimalista (i.e., calzado muy flexible y ligero, < 200 gr, con poca amortiguación), despertando un gran interés dentro de la comunidad científica y deportiva. A esta corriente se le asignaron una serie de ventajas como una mejor economía de carrera, mayor frecuencia de zancada, cambio en el patrón de pisada (i.e., de talonador a planta entera/antepié) y menor índice lesional (Lieberman y col., 2010). Aunque algunos estudios comprobaron que los corredores que corrían descalzos presentaban una mejor economía de carrera (Hanson y col., 2011), esto en parte se debe a la eliminación del peso del calzado, ya que se ha comprobado que con el mismo peso, descalzo (i.e., con peso lastrado) o calzado, la economía de carrera es similar (Divert y col., 2008) o incluso un 3-4% mejor calzado que descalzo (Franz y col., 2012).

Ortesis plantares

Las ortesis plantares que utilizan los corredores de fondo suelen proporcionar principalmente una mayor amortiguación en la zona del talón y/o soporte en el arco del pie, y están relacionadas con la comodidad y la prevención de lesiones (Salles y Gyi, 2013). A día de hoy, estas ortesis pueden ser personalizadas a las características individuales del pie a través de escáneres 3D (i.e., customizadas) o prefabricadas con un diseño estándar. Todo parece indicar que las plantillas personalizadas ofrecen una mayor sensación de ajuste y confort en la zona del talón (Salles y Gyi, 2013). Además, estas ortesis, en comparación con las prefabricadas, parecen disminuir en mayor medida la dorsiflexión y eversión del tobillo durante la primera fase de apoyo y reducen las fuerzas de impacto, variables todas ellas ligadas al riesgo de lesión (Mills, Blanch, Chapman, McPoil y Vicenzino, 2010; Salles y Gyi, 2013). Sin embargo, para algunas molestias concretas como la fascitis plantar existe controversia sobre las ventajas de la personalización o no de éstas (Lee, McKeon y Hertel, 2009). En términos generales, una mayor comodidad y ausencia de dolor proporcionada por las ortesis plantares permitirá a los corredores mantener la carga de trabajo durante más tiempo y, posiblemente, aumentar el rendimiento. Futuros estudios en esta línea permitirán establecer esta relación.

Parámetros espacio-temporales

Por último, dentro de los parámetros espacio-temporales de la carrera, se identifican el tiempo de contacto y de vuelo, la frecuencia y amplitud zancada. Hace años, Williams y Cavanagh (1987) cifraron que el 54% de la variabilidad interindividual de la economía de carrera podría deberse a diferencias en estos parámetros. Sin embargo, hasta que los sistemas de medición no han avanzado y permitido su registro de manera más sencilla, los estudios al respecto han sido escasos.

En las carreras de fondo existe controversia sobre la posible relación entre el tiempo de contacto y la economía de carrera. Mientras algunos autores no han observado ninguna relación entre estos dos parámetros (Kyrolainen y col., 2001; Støren y col., 2011; Tartaruga y col., 2012), otros comentan que un mayor tiempo de contacto afecta negativamente a la economía de carrera (Hasegawa y col., 2007; Nummela y col., 2007; Santos-Concejero y col., 2013). Estos últimos autores se basan en que un elevado tiempo de contacto provoca una deceleración significativa de la velocidad horizontal del corredor durante la fase de apoyo, pudiéndose considerar una pérdida de energía (Nummela y col., 2007). Sin embargo, ninguno de los estudios mencionados tuvo en cuenta el patrón de pisada de sus corredores y los grupos

analizados podrían haber estado formados por diferentes proporciones de corredores de planta entera/antepié y talonadores, condicionando la interpretación de sus resultados.

Los corredores de planta entera/antepié presentan ~ 20 ms o un 10% menos de tiempo de contacto que los talonadores a la misma velocidad de carrera (Di Michele y Merni, 2014; Gruber y col., 2013; Ogueta-Alday y col., 2013a y 2014). Roberts, Kram, Weyand y Taylor (1998) argumentaron que la mayoría del gasto metabólico de la carrera en bípedos (70-90%) era debido al tiempo disponible para generar fuerza, y describieron una relación inversa entre el coste metabólico de la carrera y el tiempo en el que el pie aplica fuerza sobre el suelo. De este modo, algunos estudios han observado una mayor economía de carrera en corredores talonadores que de planta entera/antepié, lo que se ha asociado con un mayor tiempo de contacto, mostrándose similares valores en frecuencia y amplitud de zancada (Ogueta-Alday y col., 2014). Además, otros estudios también coinciden en que un mayor tiempo de contacto supone una mejor economía en llano (Williams y Cavanagh, 1987; Di Michele y Merni, 2014) o cuesta arriba (Vernillo y col., 2014). Sin embargo, si el objetivo es alcanzar velocidades de carrera elevadas, como ocurre en carreras de medio fondo o velocidad, solamente con un patrón de planta entera/antepié se podría conseguir un escaso tiempo de contacto en el suelo, que no limite el tiempo de vuelo o amplitud de zancada (Hayes y Caplan, 2012), partiendo de la base de que la frecuencia de zancada tiene un rango de variación pequeño para no alterar el gasto metabólico.

La relación entre la frecuencia y amplitud de zancada y el rendimiento o la economía de carrera es aún mucho menos clara. Algunos estudios no encontraron ninguna relación (Kyrolainen y col., 2001; Støren y col., 2011; Williams y Cavanagh, 1987), y otros han observado que los corredores presentan una mejor economía de carrera escogiendo libremente una combinación entre frecuencia y amplitud de zancada para cada velocidad (Hunter y Smith, 2007; Morgan y col., 1994). Se ha observado que esta libre combinación la ajustan mejor los corredores expertos que los noveles, y puede suponer un ahorro de $3 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ en el gasto de energía (de Ruiter y col., 2013). Este ajuste inconsciente puede deberse a que los corredores con más experiencia adaptan naturalmente su carrera al esfuerzo percibido y/o que durante su carrera deportiva se adaptan fisiológicamente a correr a esa amplitud y frecuencia de carrera determinadas. Siguiendo esta línea, se ha demostrado que un “entrenamiento biomecánico” con feedback audiovisual podría ser una estrategia útil para corredores no expertos que pretendan aumentar su frecuencia de zancada (Morgan y col., 1994). Experimentalmente, un pequeño aumento de la frecuencia de zancada (~ 10%) no perjudica la economía de carrera (Hamill, Derrick y Holt, 1995), ayuda a conseguir un mayor “leg-stiffness” (Morin y col., 2007) y puede prevenir las lesiones por reducción de los impactos de las extremidades inferiores contra el suelo (Hobara, Sato, Sakaguchi, Sato y Nakawaza, 2012). A partir de los registros consultados en los estudios previamente mencionados, podríamos considerar normales los valores de frecuencia de zancada de $90 \text{ pasos} \cdot \text{min}^{-1}$ a ritmos normales de entrenamiento, $90-100 \text{ pasos} \cdot \text{min}^{-1}$ a ritmos de competición, y entre $100-110 \text{ pasos} \cdot \text{min}^{-1}$ en carreras de menor distancia y duración (e.g., 3000 m). A partir de $105-110 \text{ pasos} \cdot \text{min}^{-1}$ existiría un alto compromiso del gasto energético, ya que significaría un aumento de ~ 20% sobre la frecuencia normal de ritmos de entrenamiento. En el otro extremo, una frecuencia de $80 \text{ pasos} \cdot \text{min}^{-1}$ debería ser aumentada hasta los valores mencionados (~ 90 pasos·min⁻¹ ó ~ 10% más elevada) con motivo de disminuir el impacto en cada zancada y el riesgo de lesión (Hobara y col., 2012).

Factores psicológicos

La aportación psicológica juega un papel fundamental en la consecución de un óptimo rendimiento. Y es que a día de hoy, las diferencias entre ganar o perder unos Juegos Olímpicos (i.e., primer vs. cuarto puesto) son menores de un 2% (Birrer y Morgan, 2010), por lo que cualquier detalle o perfeccionamiento es necesario.

Intervención psicológica

Se ha observado que las estrategias que hacen reducir la percepción subjetiva del esfuerzo durante la práctica en deportes de resistencia conllevan una mejora del rendimiento (Tabla 3) (Blanchfield, Hardy, DE Morree, Staiano y Marcora, 2014). Dentro de las herramientas psicológicas, la charla interna consigo mismo durante el esfuerzo o también llamado “*self-talk*”, ha sido descrita como una de las estrategias más beneficiosas (Blanchfield y col., 2014). Esta estrategia consiste en “*un diálogo en el que el individuo interpreta sentimientos y percepciones, regula y cambia evaluaciones o convicciones y se da a sí mismo instrucciones y refuerzos*” (Hardy, Gammage y Hall, 2001). Se ha observado que tras 2 semanas de entrenamiento en charla interna, la percepción subjetiva del esfuerzo se reduce significativamente en la segunda mitad durante una prueba en cicloergómetro al 80% de la potencia máxima, aumentando el tiempo hasta el agotamiento un 15% (Blanchfield y col., 2014). Por su parte, también se ha demostrado que una intervención de 6 semanas en relajación y “*biofeedback*” (i.e., información sobre su frecuencia cardíaca, ventilación y VO₂), mejora la economía de carrera (Caird, McKenzie y Sleivert, 1999). Incluso un “*feedback*” aumentado (i.e., incrementando la expectativa de rendimiento del corredor) ha mostrado mejorar la economía de carrera, en mayor medida, conforme aumenta la duración de la prueba (Stoate, Wulf y Lewthwaite, 2012).

Dirección de la atención

La dirección de la atención durante la realización de las tareas es otra herramienta psicológica a tener en cuenta. En tareas de elevada complejidad motora y de habilidad, como es el caso del golpeo de una pelota de golf o el “*dribbling*” con un balón de fútbol, se ha descrito que en deportistas experimentados dirigir la atención hacia aspectos internos (i.e., movimientos del propio cuerpo, sensaciones físicas, velocidad y dolor) podría ser perjudicial (Schucker, Hagemann, Strauss y Volker, 2009). En deportes de resistencia los resultados no son concluyentes (Schucker y col., 2009). LaCaille, Masters y Heath (2004) vieron relación entre la dirección de la atención hacia aspectos internos y un mayor rendimiento en carrera. Por el contrario, Schucker y col. (2009) observaron que centrarse en los alrededores en vez de en el movimiento o respiración, era más económico, posibilitando al sujeto distraerse del esfuerzo físico (Tabla 3). Sin embargo, no está demostrado que sea más eficaz que una situación neutra o de control (i.e., sin dirección de la atención).

Música

La música que se escucha mientras se corre es otro factor psicológico que guarda relación con la dirección de la atención y con aspectos motivacionales. Karageorghis, Terry, Lane, Bishop y Priest (2012) recogen los principales cambios favorables que produce la música en el organismo, como son el desvío del foco de atención, desencadenamiento o regulación de los estados de ánimo, evocación de recuerdos, estímulo del movimiento rítmico, etc. Todas estas respuestas proporcionan un efecto ergogénico que hace aumentar el trabajo realizado, ya sea por reducción de la percepción subjetiva del esfuerzo o por aumento de la percepción de la capacidad para realizarlo (Karageorghis y col., 2012).

En pruebas submáximas se ha observado un efecto positivo, aumentándose el rendimiento o distancia recorrida en corredores experimentados (Szmedra y Bacharach, 1998). Sin embargo, Brownley, McMurray y Hackney (1995) afirman que la utilización de música podría ser beneficiosa para corredores novatos, pero contraproducente para corredores experimentados. Es bastante probable que las discrepancias entre estudios se deban, además de al nivel de los corredores (novatos vs experimentados) y al tipo de prueba (máxima-supramáxima vs submáxima), a las propias características de la música utilizada. Mientras unos abogan por una música más rápida y fuerte (Edworthy y Waring, 2006), otros no han obtenido diferencias entre una música motivante y una neutra (Simpson y Karageorghis, 2006), siendo difícil estandarizar las canciones. Las últimas investigaciones intentan esclarecer qué tipo de música estaría más acorde con los ritmos (i.e., frecuencias de trabajo) de los sistemas fisiológicos del ser humano (i.e., latidos del corazón y actividad cerebral cortical) (Schneider, Askew, Abel y Struder, 2010). Se ha observado que los sistemas fisiológicos tienden a trabajar a una frecuencia aproximada de 3 Hz, y que el hombre tiende a adoptar esa misma frecuencia al correr a velocidades cercanas al umbral anaeróbico (Ogueta-Alday, 2014). A su vez, se ha visto que las personas tienden a escoger músicas de 2.2.-2.8 Hz a la hora de salir a correr (Schneider y col., 2010), próximas también a los 3 Hz. Posiblemente todas estas estrategias, muchas veces inconscientes, puedan ser una manera de acoplarse a los “ritmos naturales” del cuerpo y optimizar el coste energético. Sin embargo, son necesarios mayor número de estudios específicos sobre la influencia de factores psicológicos en el rendimiento de las carreras de fondo, que tengan en cuenta las consideraciones comentadas en este apartado.

Tabla 3. Influencia de los parámetros psicológicos en la mejora del rendimiento en carreras de fondo.

Intervención	Estudio	Sujetos	Intervención/Estrategia	Mejoras
Intervención psicológica	Blanchfield y col. (2014)	8 hombres y 4 mujeres corredores nivel recreacional	14 días Intervención motivacional en self-talk Prueba: tiempo hasta agotamiento 80% P_{max} ciclogómetro	Tiempo hasta agotamiento ↑ 15.1%; RPE ↓50%
	Caird y col. (1999)	7 hombres y mujeres corredores larga distancia	42 días (3 días/sem) Entrenamiento en relajación progresiva de Jacobsen y centering + biofeedback en tapiz al 70% VAM	EC ↑
	Stoate y col. (2001)	5 hombres y 5 mujeres corredores nivel recreativo	20 min con feedback positivo (e.g., “lo estás haciendo muy bien”, “tienes muy buena EC”)	EC ↑; FC y RPE no cambios; percepción rendimiento ↑
Dirección de la atención	Schucker y col. (2009)	18 hombres y 6 mujeres nivel medio	10 min con atención interna (movimiento) + 10 min interna (respiración) + 10 min externa (alrededores)	EC ↑ y RPE ↓ con atención externa < interna (movimiento) < interna (respiración)
	La Caille y col. (2004)	60 corredores nivel recreacional	5 km Asociación (atención en bpm) y disociación (escuchar música)	Test 5 km 6.4% ↑ en asociación; RPE y nivel de satisfacción no diferencias
Música	Edworthy y Waring (2006)	15 hombres y 15 mujeres activos	Correr/andar a velocidad libre 10 min con música lenta (70 FC), rápida (200 FC), volumen bajo (60 dB), alto (80dB) y sin música	Velocidad 5.7% ↑ con música rápida y alta; FC 2.9% ↑ con música rápida (no influencia volumen); RPE no diferencias
	Szmedra y Bacharach (1998)	10 hombres corredores nivel recreacional	15 min al 70% del VO_{2max} Con y sin música	EC no diferencias; RPE 10.4% ↓ con música
	Brownley y col. (1995)	8 corredores y 8 no corredores	10 min correr/andar a intensidad baja, moderada y alta. Sin música, música lenta y rápida	Sentimiento positivo ↑ con música en no entrenados; música rápida ↑ frecuencia respiratoria

Nota: P_{max} : potencia máxima; RPE: percepción subjetiva del esfuerzo; VAM: velocidad aeróbica máxima; EC: economía de carrera; FC: frecuencia cardíaca; VO_{2max} : consumo máximo de oxígeno.

En conclusión, en esta revisión se ha analizado la influencia de un amplio abanico de factores sobre el rendimiento en carreras de fondo. El óptimo rendimiento en este tipo de carreras no sólo está condicionado por multitud de parámetros, sino por la interrelación entre todos ellos. Los factores ambientales como el aire/viento, la temperatura y humedad elevadas, la altitud y la pendiente positiva del terreno alteran negativamente el rendimiento de los corredores. A través del entrenamiento de resistencia interválico de alta intensidad, polarizado y acompañado por un programa de fuerza explosiva o pliométrica podría mejorarse el rendimiento un 3-21%. Con el objetivo de optimizar los resultados, estos entrenamientos también podrían acompañarse de preparaciones en ambientes calurosos (si la carrera objetivo se disputa en estos ambientes) o entrenamientos en altura.

Por otro lado, los estudios han observado una clara influencia positiva de los factores fisiológicos $VO_{2\text{max}}$, VT2, economía de carrera y fibras musculares tipo I sobre el rendimiento, viéndose éste perjudicado por la edad, el género, la fatiga o los parámetros antropométricos ligados a la masa corporal (i.e., peso, índice de masa corporal, porcentaje de masa grasa y sumatorio de pliegues). Un elevado leg-stiffness, una limitada flexibilidad y un calzado de poco peso ayudarán a la consecución de un mejor resultado. No obstante, la influencia del patrón de pisada o los parámetros espacio-temporales es a día de hoy confusa. Todo parece indicar que un patrón talonador es más económico que el de planta entera/antepié, aunque este último es más ventajoso para conseguir y mantener velocidades de carrera elevadas (i.e., $> 21 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). La relación entre la frecuencia y amplitud de zancada y el rendimiento es mucho menos clara, aunque desde el punto de vista energético o para la prevención de lesiones se recomiendan valores de 90 pasos·min⁻¹ a ritmos de entrenamiento y 90-100 pasos·min⁻¹ a ritmos de competición. En el plano psicológico, estrategias que reduzcan la percepción subjetiva del esfuerzo (ya sea a través de la charla interna o la dirección de la atención) o aumenten la motivación, como puede ser a través de la música, parecen ser recomendables para la mejora del rendimiento.

Referencias

- Abe, D.; Fukuoka, Y.; Muraki, S.; Yasukouchi, A.; Sakaguchi, Y., & Niihata, S. (2011). Effects of load and gradient on energy cost of running. *Journal of Physiological Anthropology*, 30(4), 153-160. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21804298>
- Ardigò, L. P.; Lafortuna, C.; Minetti, A. E.; Mognoni, P., & Saibene, F. (1995). Metabolic and mechanical aspects of foot landing type, forefoot and rearfoot strike, in human running. *Acta Physiologica Scandinavica*, 155(1), 17-22. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8553873>
- Basset, D. R., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(1), 70-84. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10647532>
- Beattie, K.; Kenny, I. C.; Lyons, M., & Carson, B. P. (2014). The effect of strength training on performance in endurance athletes. *Sports Medicine*, 44(6), 845-865. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24532151>
- Berg, K. (2003). Endurance training and performance in runners: research limitations and unanswered questions. *Sports Medicine*, 33(1), 59-73. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12477378>
- Bernard, T.; Vercruyssen, F.; Grego, F.; Hausswirth, C.; Lepers, R.; Vallier, J. M., & Brisswalter, J. (2003). Effect of cycling cadence on subsequent 3 km running performance in well trained triathletes. *British Journal of Sports Medicine*, 37(2), 154-158. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12663359>

- Berryman, N.; Maurel, D., & Bosquet, L. (2010). Effect of plyometric vs. dynamic weight training on the energy cost of running. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(7), 1818-1825. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20543734>
- Bertelsen, M. L.; Jensen, J. F.; Nielsen, M. H.; Nielsen, R. O., & Rasmussen, S. (2013). Footstrike patterns among novice runners wearing a conventional, neutral running shoe. *Gait and Posture*, 38(2), 354-356.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23280125>
- Bertuzzi, R.; Bueno, S.; Pasqua, L. A.; Acuesta, F. M.; Batista, M. B.; Roschel, H.; Kiss, M. A.; Serrão, J. C.; Tricoli, V., & Ugrinowitsch, C. (2012). Bioenergetics and neuromuscular determinants of the time to exhaustion at velocity corresponding to VO₂max in recreational long-distance runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(8), 2096-2102. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22027852>
- Birrer, D., & Morgan, G. (2010). Psychological skills training as a way to enhance an athlete's performance in high-intensity sports. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 20(Suppl 2), 78-87.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20840565>
- Blanchfield, A. W.; Hardy, J.; DE Morree, H. M.; Staiano, W., & Marcra, S. M. (2014). Talking yourself out of exhaustion: the effects of self-talk on endurance performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 46(5), 998-1007.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24121242>
- Bosquet, L.; Leger, L., & Legros, P. (2002). Methods to determine aerobic endurance. *Sports and Medicine*, 32(11), 675-700.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12196030>
- Brownley, K. A.; McMurray, R. G., & Hackney, A. C. (1995). Effects of music on physiological and affective responses to graded treadmill exercise in trained and untrained runners. *International Journal of Psychophysiology*, 19(3), 193-201.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7558986>
- Burtscher, M.; Gatterer, H.; Faulhaber, M.; Gerstgrasser, W., & Schenk, K. (2010). Effects of intermittent hypoxia on running economy. *International Journal of Sports Medicine*, 31(9), 644-650. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20589591>
- Caird, S. J.; McKenzie, A. D., & Sleivert, G. G. (1999). Biofeedback and relaxation techniques improves running economy in sub-elite long distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(5), 717-722.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10331893>
- Cheuvront, S.N., & Haymes, E.M. (2001). Thermoregulation and marathon running: biological and environmental influences. *Sports Medicine*, 31(10), 743-762.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11547895>
- Coyle, E. F. (2007). Physiological regulation of marathon performance. *Sport Medicine*, 37(4-5), 306-311. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17465595>
- Craib, M. W.; Mitchell, V. A., & Fields, K. B. (1996). The association between flexibility and running economy in sub-elite male distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(6), 737-743.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8784761>
- Cuddy, J. S.; Hailes, W. S., & Ruby, B. C. (2014). A reduced core to skin temperature gradient, not a critical core temperature, affects aerobic capacity in the heat. *Journal of Thermal Biology*, 43, 7-12.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24956952>
- Cunningham, C. B.; Schilling, N.; Anders, C., & Carrier, D. R. (2010). The influence of foot posture on the cost of transport in humans. *Journal of Experimental Biology*, 213(5), 790-797. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20154195>

- Daniels, J., & Daniels, N. (1992). Running economy of elite male and elite female runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(4), 483-489. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1560747>
- de Paula Viveiros, J.; Amorim, F. T.; Alves, M. N.; Passos, R. L., & Meyer, F. (2012). Run performance of middle-aged and young adult runners in the heat. *International Journal of Sports Medicine*, 33(3), 211-217. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22161295>
- de Ruiter, C. J.; Verdijk, P. W.; Werker, W.; Zuidema, M. J., & de Hann, A. (2014). Stride frequency in relation to oxygen consumption in experienced and novice runners. *European Journal of Sport Science*, 14(3), 251-258. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23581294>
- Di Michele, R., & Merni, F. (2014). The concurrent effects of strike pattern and ground-contact time on running economy. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 17(4), 414-418. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23806876>
- Divert, C.; Mornieux, G.; Freychat, P.; Baly, L.; Mayer, F., & Belli, A. (2008). Barefoot-shod running differences: shoe or mass effect? *International Journal of Sports Medicine*, 29(6), 512-518. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18027308>
- Dumke, C. L.; Pfaffenroth, C. M.; McBride, J. M., & McCauley, G. O. (2010). Relationship between muscle strength, power and stiffness and running economy in trained male runners. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(2), 249-261. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20625197>
- Edworthy, J., & Waring, H. (2006). The effects of music tempo and loudness level on treadmill exercise. *Ergonomics*, 49(15), 1597-1610. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17090506>
- El Helou, N.; Tafflet, M.; Berthelot, G.; Toalini, J.; Marc, A.; Guillaume, M.; Hausswirth, C., & Toussaint, J. F. (2012). Impact of environmental parameters on marathon running performance. *PLoS One*, 7(5): e37407. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22649525>
- Ely, M. R.; Cheuvront, S. N.; Roberts, W. O., & Montain, S. J. (2007). Impact of weather on marathon-running performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(3), 487-493. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17473775>
- Esteve-Lanao, J.; Foster, C.; Seiler, S., & Lucia, A. (2007). Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3), 943-949. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17685689>
- Esteve-Lanao, J.; San Juan, A. F.; Earnest, C. P.; Foster, C., & Lucia, A. (2005). How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(3), 496-504. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15741850>
- Ferrero, J. A., y Fernández, A. (2001). Consumo de oxígeno: concepto, bases fisiológicas y aplicaciones. En J. López Chicharro, y A. Fernández Vaquero (Eds.), *Fisiología del ejercicio* (pp. 247-257). Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- Fields, K. B.; Sykes, J. C.; Walker, K. M., & Jackson, J. C. (2010). Prevention of running injuries. *Current Sports Medicine Reports*, 9(3), 176-182. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20463502>
- Foster, C., & Lucia, A. (2007). Running economy: the forgotten factor in elite performance. *Sports Medicine*, 37(4-5), 316-319. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17465597>

- Franz, J. R.; Wierzbinski, C. M., & Kram, R. (2012). Metabolic cost of running barefoot versus shod: is lighter better? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(8), 1519-1525. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22367745>
- García Ferrando, M., y Llopis Goig R. (2010). *Ideal democrático y bienestar personal. Encuesta sobre los hábitos deportivos en España 2010*. Madrid: Consejo Superior de Deportes y Centro de Investigaciones Sociológicas.
<http://www.csd.gob.es/csd/estaticos/dep-soc/encuesta-habitos-deportivos2010.pdf>
- García-López, J. (2008). Manifestación de las fuerzas aerodinámicas en diferentes deportes: ciclismo y atletismo. En M. Izquierdo (Ed.). *Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte* (pp. 415-445). Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- Gruber, A. H.; Umberger, B. R.; Braun, B., & Hamill, J. (2013). Economy and rate of carbohydrate oxidation during running with rearfoot or forefoot strike patterns. *Journal of Applied Physiology*, 115(2), 194-201.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23681915>
- Hamill, J.; Derrick, T. R., & Holt, K. G. (1995). Shock attenuation and stride frequency during running. *Human Movement Science*, 14(1), 45-60.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016794579500004C>
- Hanson, N. J.; Berg, K.; Deka, P.; Meendering, J. R., & Ryan, C. (2011). Oxygen cost of running barefoot vs. running shod. *International Journal of Sports Medicine*, 32(6), 401-406. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21472628>
- Hardy, J.; Gammage, K., & Hall, C. (2001). A descriptive study of athlete self-talk. *The Sports Psychologist*, 15, 306-318. <http://goo.gl/XcVxf6>
- Hasegawa, H.; Yamauchi, T., & Kramer, W. J. (2007). Foot strike patterns of runners at the 15 km point during an elite-level half marathon. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3), 888-893.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17685722>
- Hatala, K. G.; Dingwall, H. L.; Wunderlich, R. E., & Richmond, B. G. (2013). Variation in foot strike patterns during running among habitually barefoot populations. *PLoS One*, 8(1), e52548. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23326341>
- Hausswirth, C.; Bigard, A. X., & Guezennec, C. Y. (1997). Relationships between running mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *International Journal of Sports Medicine*, 18(5), 330-339.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9298772>
- Hayes, P., & Caplan, N. (2012). Foot strike patterns and ground contact times during high-calibre middle-distance races. *Journal of Sports Science*, 30(12), 1275-1283.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22857152>
- Hayes, P. R., & Walker, A. (2007). Pre-exercise stretching does not impact upon running economy. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(4), 1227-1232.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22857152>
- Helgerud, J.; Støren, O., & Hoff, J. (2010). Are there differences in running economy at different velocities for well-trained distance runners? *European Journal of Applied Physiology*, 108(6), 1099-1105. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20024579>
- Hendriksen, I. J., & Meeuwsen, T. (2003). The effect of intermittent training in hypobaric hypoxia on sea-level exercise: a cross-over study in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 88(4-5), 396-403.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12527969>
- Hobara, H.; Sato, T.; Sakaguchi, M.; Sato, T., & Nakawaza, K. (2012). Step frequency and lower extremity loading during running. *International Journal of Sports Medicine*, 33(4), 310-313. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22383130>

- Hue, O. (2011). The challenge of performing aerobic exercise in tropical environments: applied knowledge and perspectives. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(4), 443-454.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22248546>
- Hue, O.; Le Gallais, D.; Chollet, D.; Boussana, A., & Prefaut, C. (1998). The influence of prior cycling on biomechanical and cardiorespiratory response profiles during running in triathletes. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 77(1-2), 98-105. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9459528>
- Hue, O.; Voltaire, B.; Galy, O.; Costes, O.; Callis, A.; Hertogh, C., & Blonc, S. (2004). Effects of 8 days acclimation on biological and performance response in a tropical climate. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 44(1), 30-37. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15181387>
- Humberstone-Gough, C. E.; Saunders, P. U.; Bonetti, D. L.; Stephens, S.; Bullock, N.; Anson, J. M., & Gore, C. J. (2013). Comparison of live high: train low altitude and intermittent hypoxic exposure. *Journal of Sports Science and Medicine*, 12(3), 394-401. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24149143>
- Hunter, I., & Smith, G. A. (2007). Preferred and optimal stride frequency, stiffness and economy: Changes with fatigue during a 1-h high-intensity run. *European Journal of Applied Physiology*, 100(6), 653-661.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17602239>
- Hunter, S. K., & Stevens, A. A. (2013). Sex differences in marathon running with advanced age: physiology or participation? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(1), 148-156. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22843112>
- IAAF. International Association of the Athletics Federations. (s.f.). Recuperado de: <http://www.iaaf.org/results?&subcats=WCH>
- IAAF. International Association of the Athletics Federations. (2014). Kimetto breaks marathon world record in Berlin with 2:02:57. Recuperado de: <http://goo.gl/aYAoor>
- Impellizzeri, F. M.; Marcora, S. M.; Castagna, C.; Reilly, T.; Sassi, A.; Iaia, F. M., & Rampinini, E. (2006). Physiological and performance effects of generic versus specific aerobic training in soccer players. *International Journal of Sports Medicine*, 27(6), 483-492. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16767613>
- Jones, A. M., & Doust, J. H. (1996). A 1% treadmill grade most accurately reflects the energetic cost of outdoor running. *Journal of Sports Science*, 14(4), 321-327. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8887211>
- Karageorghis, C. I.; Terry, P. C.; Lane, A. M.; Bishop, D. T., & Priest, D. L. (2012). The BASES Expert Statement on use of music in exercise. *Journal of Sports Science*, 30(9), 953-956. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22512537>
- Karsten, B.; Stevens, L.; Colpus, M.; Larumbe-Zabala, E., & Naclerio, F. (2015). The effects of a sports specific maximal strength and conditioning training on critical velocity, anaerobic running distance and 5-km race performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(1), 80-85. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25946163>
- Kasmer, M. E.; Liu, X. C.; Roberts, K. G., & Valadao, J. M. (2013). Foot-strike pattern and performance in a marathon. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(3), 286-292. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23006790>
- Katayama, K.; Matsuo, H.; Ishida, K.; Mori, S., & Miyamura, M. (2003). Intermittent hypoxia improves endurance performance and submaximal exercise efficiency. *High Altitude Medicine & Biology*, 4(3), 291-304.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14561235>

- Knechtle, B.; Duff, B.; Welzel, U., & Kohler, G. (2009). Body mass and circumference of upper arm are associated with race performance in ultraendurance runners in a multistage race--the Isarrun 2006. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 80(2), 262-268. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19650392>
- Knechtle, B.; Knechtle, P., & Rosemann, T. (2010). Race performance in male mountain ultra-marathoners: anthropometry or training? *Perceptual and Motor Skills*, 110(3 Pt 1), 721-735. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20681327>
- Kumagai, S.; Tanaka, K.; Matsuura, Y.; Matsuzaka, A.; Hirakoba, K., & Asano, K. (1982). Relationships of the anaerobic threshold with the 5 km, 10 km, and 10 mile races. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 49(1), 13-23. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7201924>
- Kyröläinen, H.; Belli, A., & Komi, P. V. (2001). Biomechanical factors affecting running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(8), 1330-1337. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11474335>
- LaCaille, R. A.; Masters, K. S., & Heath, E. M. (2004). Effects of cognitive strategy and exercise setting on running performance, perceived exertion, affect, and satisfaction. *Psychology of Sport and Exercise*, 5(4), 461-476. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1469029203000396>
- Lara, B.; Salinero, J. J., & Del Coso, J. (2014). Altitude is positively correlated to race time during the marathon. *High Altitude Medicine and Biology*, 15(1), 64-69. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24444110>
- Larsen, H. B.; Christensen, D. L.; Nolan, T., & Søndergaard, H. (2004). Body dimensions, exercise capacity and physical activity level of adolescent Nandi boys in western Kenya. *Annals of Human Biology*, 31(2), 159-173. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15204359>
- Larson, P.; Higgins, E.; Kaminski, J.; Decker, T.; Preble, J.; Lyons, D.; McIntyre, K., & Normile, A. (2011). Foot strike patterns of recreational and sub-elite runners in a long-distance road race. *Journal of Sports Science*, 29(15), 1665-1673. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22092253>
- Lee, S. Y.; McKeon, P., & Hertel, J. (2009). Does the use of orthoses improve self-reported pain and function measures in patients with plantar fasciitis? A meta-analysis. *Physical Therapy in Sport*, 10(1), 12-18. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19218074>
- Lieberman, D. E.; Venkadesan, M.; Werbel, W. A.; Daoud, A. I.; D'Andrea, S.; Davis, I. S.; Mang'eni, R. O., & Pitsiladis, Y. (2010). Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature*, 463(7280), 531-535. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20111000>
- López Chicharro, J.; Calvo Martínez, F., y Fernández Vaquero, A. (2001). Consumo de oxígeno: concepto, bases fisiológicas y aplicaciones. En J. López Chicharro, & A. Fernández Vaquero (Eds.). *Fisiología del ejercicio* (pp. 247-257). Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- Lucia, A.; Esteve-Lanao, J.; Olivan, J.; Gomez-Gallego, F.; San Juan, A. F.; Santiago, C., Pérez, M., Chamorro-Viña, C., & Foster, C. (2006). Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 31(5), 530-540. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17111007>
- Marino, F. E.; Lambert, M. I., & Noakes, T. D. (2004). Superior performance of African runners in warm humid but not in cool environmental conditions. *Journal of Applied Physiology*, 96(1), 124-130. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12949014>

- Maughan, R. J. (2010). Distance running in hot environments: a thermal challenge to the elite runner. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 20(Suppl 3), 95-102. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21029196>
- McArdle, W. D.; Katch, F. I., y Katch, V. L. (2004). *Fundamentos de fisiología del ejercicio*. Aravaca (Madrid): McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U.
- McCann, D. J., & Higginson, B. K. (2008). Training to maximize economy of motion in running gait. *Current Sports Medicine Reports*, 7(3), 158-162. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18477874>
- Midgley, A. W.; McNaughton, L. R., & Jones, A. M. (2007). Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance. *Sports Medicine*, 37(10), 857-880. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17887811>
- Millet, G. P.; Roels, B.; Schmitt, L.; Woorons, X., & Richalet, J. P. (2010). Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Medicine*, 40(1), 1-25. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20020784>
- Mills, K.; Blanch, P.; Chapman, A. R.; McPoil, T. G., & Vicenzino, B. (2010). Foot orthoses and gait: a systematic review and meta-analysis of literature pertaining to potential mechanisms. *British Journal of Sports Medicine*, 44(14), 1035-1046. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19996330>
- Morgan, D.; Martin, P.; Craib, M.; Caruso, C.; Clifton, R., & Hopewell, R. (1994). Effect of step length optimization on the aerobic demand of running. *Journal of Applied Physiology*, 77(1), 245-251. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7961241>
- Morgan, D. W., & Craib, M. (1992). Physiological aspects of running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(4), 456-461. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1560743>
- Morin, J. B.; Samozino, P.; Zamezati, K., & Belli, A. (2007). Effects of altered stride frequency and contact time on leg-spring behavior in human running. *Journal of Biomechanics*, 40(15), 3341-3348. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17602692>
- Mooses, M.; Mooses, K.; Haile, D. W.; Durussel, J.; Kaasik, P., & Pitsiladis, Y. P. (2015). Dissociation between running economy and running performance in elite Kenyan distance runners. *Journal of Sports Science*, 33(2), 136-144. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24916998>
- Muñoz, I.; Seiler, S.; Bautista, J.; España, J.; Larumbe, E., & Esteve-Lanao, J. (2014). Does polarized training improve performance in recreational runners? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(2), 265-272. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23752040>
- Nielsen, B.; Hales, J. R.; Strange, S.; Christensen, N. J.; Warberg, J., & Saltin, B. (1993). Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. *The Journal of Physiology*, 460, 467-485. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8487204>
- Nielsen, B.; Søren, S.; Christensen, N. J.; Warberg, J., & Saltin, B. (1997). Acute and adaptive responses in humans to exercise in a warm, humid environment. *Pflügers Archiv European Journal of Physiology*, 434(1), 49-56. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9094255>
- Nummela, A.; Keranen, T., & Mikkelsson, L. O. (2007). Factors related to top running speed and economy. *International Journal of Sports Medicine*, 28(8), 655-661. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17549657>

- Ogueta-Alday, A.; Morante, J. C.; Rodríguez-Marroyo, J. A., & García-López, J. (2013 a). Validation of a new method to measure contact and flight times during treadmill running. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(5), 1455-1462. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22836607>
- Ogueta-Alday, A.; Rodríguez-Marroyo, J. A., & García-López, J. (2013 b). Variables antropométricas, fisiológicas y biomecánicas determinantes del rendimiento en corredores de media maratón. *Biomecánica*, 21(1), 20-29. <http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/15652/1/20-29.pdf>
- Ogueta-Alday, A.; Rodríguez-Marroyo, J. A., & García-López, J. (2014). Rearfoot striking runners are more economical than midfoot strikers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 46(3), 580-585. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24002340>
- Olympic.org. Official website of the Olympic Movement. (s.f.). Recuperado de: <http://www.olympic.org/olympic-games>
- Paavolainen, L.; Häkkinen, K.; Hämäläinen, I.; Nummela, A., & Rusko, H. (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *Journal of Applied Physiology*, 86(5), 1527-1533. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10233114>
- Perl, D. P.; Daoud, A. I., & Lieberman, D. E. (2012). Effects of footwear and strike type on running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(7), 1335-1343. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22217565>
- Piacentini, M. F.; De Ioannon, G.; Comotto, S.; Spedicato, A.; Vernillo, G., & La Torre, A. (2013). Concurrent strength and endurance training effects on running economy in master endurance runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(8), 2295-2303. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23207882>
- Pugh, L. G. (1970). Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance. *Journal of Physiology*, 207(3), 823-835. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5532903>
- Rabadán, M.; Díaz, V.; Calderón, F. J.; Benito, P. J.; Peinado, A. B., & Maffuli, N. (2011). Physiological determinants of speciality of elite middle- and long-distance runners. *Journal of Sports Science*, 29(9), 975-982. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21604227>
- Roberts, T. J.; Kram, R.; Weyand, P. G., & Taylor, C. R. (1998). Energetics of bipedal running. I. Metabolic cost of generating force. *Journal of Experimental Biology*, 201(Pt 19), 2745-2751. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9732329>
- Roels, B.; Millet, G. P.; Marcoux, C. J.; Coste, O.; Bentley, D. J., & Candau, R. B. (2005). Effects of hypoxic interval training on cycling performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(1), 138-146. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15632680>
- Roi, G. S.; Giacometti, M., & Von Duvillard, S. P. (1999). Marathons in altitude. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(5), 723-728. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10331894>
- Roy, J. P., & Stefanyshyn, D. J. (2006). Shoe midsole longitudinal bending stiffness and running economy, joint energy, and EMG. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(3), 562-569. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16540846>
- Salles, A. S., & Gyi, D. E. (2013). An evaluation of personalised insoles developed using additive manufacturing. *Journal of Sports Science*, 31(4), 442-450. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23083421>

- Saltin, B.; Kim, C. K.; Terrados, N.; Larsen, H.; Svedenhag, J., & Rolf, C. J. (1995). Morphology, enzyme activities and buffer capacity in leg muscles of Kenyan and Scandinavian runners. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 5(4), 222-230. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7552767>
- Santos-Concejero, J.; Granados, C.; Irazusta, J.; Bidaurrazaga-Letona, I.; Zabala-Lili, J.; Tam, N., & Gil, S. M. (2013). Differences in ground contact time explain the less efficient running economy in north african runners. *Biology of Sport*, 30(3), 181-187. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24744486>
- Sasaki, K., & Neptune, R. R. (2006). Muscle mechanical work and elastic energy utilization during walking and running near the preferred gait transition speed. *Gait and Posture*, 23(3), 383-390. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16029949>
- Saugy, J. J.; Schmitt, L.; Cejuela, R.; Faiss, R.; Hauser, A.; Wehrli, J. P.; Rudaz, B.; Delessert, A.; Robinson, N., & Millet, G. P. (2014). Comparison of "Live High-Train Low" in normobaric versus hypobaric hypoxia. *PLoS One*, 9(12), e114418. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25517507>
- Saunders, P. U.; Pyne, D. B.; Telford, R. D., & Hawley, J. A. (2004). Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Medicine*, 34(7), 465-485. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15233599>
- Sawyer, B. J.; Blessinger, J. R.; Irving, B. A.; Weltman, A.; Patrie, J. T., & Gaesser, G.A. (2010). Walking and running economy: inverse association with peak oxygen uptake. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(11), 2122-2127. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20351592>
- Schneider, S.; Askew, C. D.; Abel, T., & Strudler, H. K. (2010). Exercise, music, and the brain: is there a central pattern generator? *Journal of Sports Science*, 28(12), 1337-1343. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20845211>
- Schucker, L.; Hagemann, N.; Strauss, B., & Volker, K. (2009). The effect of attentional focus on running economy. *Journal of Sports Science*, 27(12), 1241-1248. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19787539>
- Seiler, K. S., & Kjenland, G. Ø. (2006). Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an "optimal" distribution? *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 16(1), 49-56. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16430681>
- Shaw, A. J.; Ingham, S. A., & Folland, J. P. (2014). The valid measurement of running economy in runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 46(10), 1968-1973. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24561819>
- Simpson, S. D., & Karageorghis, C. I. (2006). The effects of synchronous music on 400-m sprint performance. *Journal of Sports Science*, 24(10), 1095-1102. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17115524>
- Spurrs, R. W.; Murphy, A. J., & Watsford, M. L. (2003). The effect of plyometric training on distance running performance. *European Journal of Applied Physiology*, 89(1), 1-7. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12627298>
- Stearne, S. M.; Alderson, J. A.; Green, B. A.; Donnelly, C. J., & Rubenson, J. (2014). Joint kinetics in rearfoot versus forefoot running: implications of switching technique. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 46(8), 1578-1587. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24500531>
- Sterken, E. (2001). Endurance and age: evidence from long-distance running data. Recuperado de:
<http://som.eldoc.ub.rug.nl/FILES/reports/themeE/2001/01E47/01E47.pdf>

- Steudel-Numbers, K. L.; Weaver, T. D., & Wall-Scheffler, C. M. (2007). The evolution of human running: effects of changes in lower-limb length on locomotor economy. *Journal of Human Evolution*, 53(2), 191-196.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17574650>
- Stoate, I.; Wulf, G., & Lewthwaite, R. (2012). Enhanced expectancies improve movement efficiency in runners. *Journal of Sports Science*, 30(8), 815-823.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22439657>
- Støren, Ø.; Helgerud, J., & Hoff, J. (2011). Running stride peak forces inversely determines running economy in elite runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(1), 117-123. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20093965>
- Støren, Ø.; Helgerud, J.; Stoa, E. M., & Hoff, J. (2008). Maximal strength training improves running economy in distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(6), 1087-1092. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18460997>
- Stray-Gundersen, J.; Chapman, R. F., & Levine, B. D. (2001). "Living high-training low" altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *Journal of Applied Physiology*, 91(3), 1113-1120.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11509506>
- Suances, P. R. (2014). Running, una fiebre multimillonaria. *El Mundo*. Recuperado de: <http://www.elmundo.es/economia/2014/01/19/52daf5db22601d436e8b4574.html>
- Svedenhag, J. (2000). Running Economy. En J. Bangsbo & H. B. Larsen (Eds.), *Running & Science in an interdisciplinary Perspective* (pp. 85-107). Copenhagen: Institute of Exercise and Sport Sciences.
- Szmedra, L., & Bacharach, D. W. (1998). Effect of music on perceived exertion, plasma lactate, norepinephrine and cardiovascular hemodynamics during treadmill running. *International Journal of Sports Medicine*, 19(1), 32-37.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9506797>
- Taipale, R. S.; Mikkola, J.; Vesterinen, V.; Nummela, A., & Häkkinen, K. (2013). Neuromuscular adaptations during combined strength and endurance training in endurance runners: maximal versus explosive strength training or a mix of both. *European Journal of Applied Physiology*, 113(2), 325-335.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22711181>
- Tartaruga, M. P.; Brisswalter, J.; Peyrè-Tartaruga, L. A.; Avila, A. O.; Alberton, C. L.; Coertjens, M.; Cadore, E. L.; Tiggemann, C. L.; Silva, E. M., & Kruel, L. F. (2012). The relationship between running economy and biomechanical variables in distance runners. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 83(3), 367-375.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22978185>
- Townshend, A. D.; Worringham, C. J., & Stewart, I. B. (2010). Spontaneous pacing during overground hill running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(1), 160-169. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20010117>
- Trappe, S. (2007). Marathon runners. How do they age? *Sports Medicine*, 37(4-5), 302-305. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17465594>
- Vernillo, G.; Savoldelli, A.; Zignoli, A.; Trabucchi, P.; Pellegrini, B.; Millet, G. P., & Schena, F. (2014). Influence of the world's most challenging mountain ultra-marathon on energy cost and running mechanics. *European Journal of Applied Physiology*, 114(5), 929-939. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24477570>
- Wehrlein, J. P.; Zuest, P.; Hallén, J., & Martí, B. (2006). Live high-train low for 24 days increases hemoglobin mass and red cell volume in elite endurance athletes. *Journal of Applied Physiology*, 100(6), 1938-1945.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16497842>

- Weston, A. R.; Mbambo, Z., & Myburgh, K. H. (2000). Running economy of African and Caucasian distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(6), 1130-1134. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10862541>
- Wilber, R. L. (2011). Application of altitude/hypoxic training by elite athletes. *Journal of Human Sport and Exercise*, 6(2), 271-286.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17805095>
- Williams, K. R., & Cavanagh, P. R. (1987). Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *Journal of Applied Physiology*, 63(3), 1236-1245. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3654469>
- Wilson, J. M.; Hornbuckle, L. M.; Kim, J. S.; Ugrinowitsch, C.; Lee, S. R.; Zourdos, M. C.; Sommer, B., & Panton, L. B. (2010). Effects of static stretching on energy cost and running endurance performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(9), 2274-2279. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19918196>