

Monograph

Economía de Carrera: Un Parámetro Multifactorial

Daniel Boullosa, PhD¹ y José L Tuimil López¹

¹Facultad de CC. del Deporte y la E.F., INEF-Galicia, A Coruña, España.

RESUMEN

Tradicionalmente el consumo máximo de oxígeno (VO_2 máx.) y el umbral anaeróbico (U_{AN}) han servido para explicar la mejor competencia en carreras de mediofondo y fondo. Posteriormente se ha propuesto a la economía de carrera (EC), definida como el consumo relativo de oxígeno a una velocidad determinada, como un factor que discrimina satisfactoriamente el rendimiento en muchos casos (p.e. corredores con un VO_2 máx. similar). Este parámetro, de forma reciente, está cobrando protagonismo en la literatura científica pues se está relacionando a un mayor rendimiento asociado a la mejora de los factores neuromusculares y de la capacidad anaeróbica. El objetivo de este trabajo es sintetizar qué factores influyen en la economía de carrera, tanto intrínsecos como extrínsecos al corredor, para la optimización del proceso de entrenamiento. En la parte final de esta revisión seleccionamos algunas de las estrategias más novedosas planteadas en la bibliografía reciente para mejorar la EC, valorando la utilidad de la velocidad aeróbica máxima (VAM) como parámetro de control y seguimiento.

Palabras Clave: eficiencia, carreras de fondo, entrenamiento, velocidad aeróbica máxima

INTRODUCCION

Desde los trabajos clásicos del Premio Nobel A.V. Hill, allá por los años veinte (Hill y Lupton, 1923), el paradigma del consumo máximo de oxígeno (VO_2 máx.) ha explicado el mayor rendimiento de algunos corredores a partir de una mejor capacidad de aportar O_2 al músculo y de la utilización que éste hace del O_2 para la obtención de la energía necesaria para la producción de trabajo físico (Noakes, 1988). Aunque el VO_2 máx. sí discrimina perfectamente a una población de corredores heterogénea, este parámetro es menos eficaz para discriminar el rendimiento en carreras de fondo en cuanto intentamos comparar a atletas de una prestación similar, en la que incluso nos podemos encontrar la paradoja de que atletas con un VO_2 máx. elevado poseen peores marcas que otros atletas con VO_2 máx. más modesto (Daniels, 1985).

El otro parámetro más utilizado tradicionalmente para la valoración en el rendimiento en carreras de fondo y en otras especialidades de resistencia es el umbral anaeróbico (U_{AN}), aunque son varios los parámetros descritos referidos a este concepto en la literatura (Roecker et al., 1998; Billat et al., 2003). El U_{AN} representa el punto en el cual la relación entre producción y eliminación del lactato no mantiene su equilibrio, empezando a incrementarse de esta forma su concentración en sangre, lo que es muy útil a la hora de estudiar cómo el trabajo a un % del VO_2 máx. se relaciona con una intensidad de esfuerzo determinada, y en qué medida interviene el metabolismo anaeróbico en esa zona de intensidad.

Pero estos dos factores, VO_2 máx. y U_{AN} , siguen sin esclarecer el porqué de las diferencias de rendimiento, haciéndose de esta forma necesaria la consideración de la Economía de carrera (EC) (Daniels, 1985; Basset and Howley, 2000), entendida como el consumo de O_2 a una velocidad submáxima de carrera ($ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$). Esto permite comprender cómo un corredor

tiene un dispendio energético menor que otro a una velocidad constante, lo que le permite correr durante más tiempo a esa velocidad, o visto de otra forma, cómo esa EC le permite correr a una velocidad mayor una distancia determinada con un consumo de O_2 similar, aunque, como apuntan Hausswirth & Brisswalter (1999), no necesariamente ha de mostrar una correlación altamente significativa con el rendimiento deportivo, que es un proceso multifactorial. Se pueden encontrar en la literatura otros términos relacionados con el metabolismo energético de la carrera tales como “la demanda aeróbica de la carrera” (Morgan et al., 1995) y “el coste energético de la carrera” (Cr) (Di Prampero, 1986).

El término de economía energética está vinculado al de eficiencia. En general, la eficiencia de la locomoción humana varía entre el 20 y el 30% (McArdle y col., 1990). El problema de estos cálculos es que no se está midiendo realmente la potencia mecánica producida, puesto que siempre se está ejecutando trabajo no cuantificable que puede o no estar incidiendo positivamente en la producción del movimiento. Podemos así afirmar que las mediciones exactas de eficiencia no son posibles en los movimientos deportivos. Ésta es la razón por la que se prefiere hablar de “Economía de movimiento” (EM) (Frederick, 1992). La EM se define como la potencia metabólica relativa o energía relativa a la ejecución de una tarea determinada. Como el trabajo externo realizado se expresa como la fuerza que actúa por una distancia vertical, esto es relativamente fácil de calcular en pruebas con ergometría o que supongan la elevación de la masa corporal. En ejercicios horizontales tales como andar o correr los requerimientos de energía metabólica son generalmente estimados a partir del consumo de oxígeno y a ritmo estable (McArdle y col., 1990).

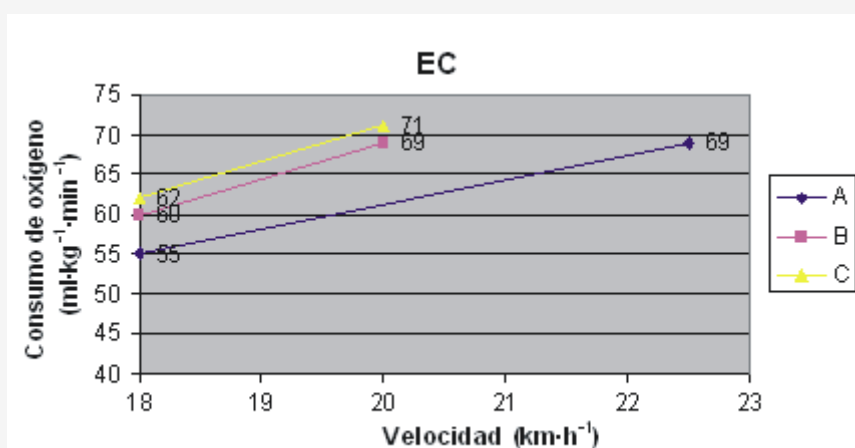


Figura 1. Comparación de la EC, velocidad aeróbica máxima (VAM) y VO_2 máx. en tres corredores teóricos (A, B, y C) que difieren en su EC y en su VAM. Nótese como el corredor menos económico C alcanza la misma VAM que B, pero un mayor VO_2 máx.; mientras el corredor más económico A alcanza una mayor VAM con un VO_2 máx. igual al corredor B y menor que el corredor C (adaptado de Noakes, 2001).

En el presente artículo abordaremos el estudio de este concepto, complejo en su naturaleza por la multitud de factores implicados, teniendo en cuenta las consideraciones metodológicas necesarias para su estudio y destacando la importancia de los factores neuromusculares. Finalmente, completaremos la revisión con el estudio de los trabajos recientes más novedosos y originales en los que se ha conseguido manipular satisfactoriamente la EC como variable dependiente.

CONSIDERACIONES METODOLOGICAS PARA LA VALORACION DE LA EC

Cinética del Consumo de Oxígeno

Debido a que corriendo a velocidades submáximas el ritmo estable de consumo de oxígeno no suele alcanzarse antes de los 3 min (Xu y Rhodes, 1999), Svedenhag (2001) recomienda que cada estadio de velocidad submáximo dure al menos 4 min para poder asegurar, de esta manera, que se ha alcanzado una cinética estable en el consumo de oxígeno. La existencia de un componente lento en la cinética de oxígeno a partir de intensidades por encima del umbral anaeróbico (Gaesser y Poole, 1996), implica una dificultad en la valoración de la EC en los dominios severo y pesado del ejercicio. La alternativa para el cálculo del coste metabólico en estos dominios de intensidad sería la introducción en los cálculos del equivalente

energético del lactato ($2,7-3,3 \text{ ml}_{\text{O}_2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mM}^{-1}$; di Prampero, 1981).



Figura 2. *Atleta realizando una prueba de esfuerzo en pista empleando un sistema telemétrico para la medición del consumo de oxígeno.*

Familiarización con el Protocolo

Un aspecto a reseñar, en el caso de la valoración en laboratorio, es la acomodación al tapiz rodante, ya que en el caso de sujetos no entrenados y en corredores inexpertos, la falta de adaptación al tapiz podría perjudicar la mecánica de carrera. En este sentido, está comúnmente aceptado que un periodo de acomodación de 30 min para corredores habituados al tapiz y un periodo de 60 min para corredores no habituados, es suficiente para establecer un patrón de carrera estable en una sesión previa a la de toma de datos (Cavanagh y Williams, 1982). En el caso de los niños, una sesión de familiarización de 15 min ha resultado ser apropiada (Keefer et al., 2000).

Variabilidad de la EC

Varios autores han estudiado la variación intra-individual del VO_2 submáximo durante la carrera en tapiz rodante, con un CV que varía entre el 1 y el 4% en corredores hombres y mujeres moderadamente y bien entrenados, en los que las condiciones como la hora del día, la actividad de entrenamiento, el calzado y la familiarización con el tapiz rodante estaban controladas (Morgan y Craib, 1992; Morgan et al., 1991; 1994; 1995; Pereira y Freedson, 1997; Saunders et al., 2004). Del conjunto de estudios, podemos concluir que la variabilidad es menor cuanto mayor es el nivel de los sujetos y el número de sesiones de familiarización.

Determinación del Índice de Economía

Debido a que los sujetos más pesados tienen una demanda aeróbica menor por kilo de peso (Bergh et al., 1991; Martin y Morgan, 1992), se debería, de cara a la normalización del efecto de la masa corporal en la EC, determinar el consumo máximo y submáximo de oxígeno en relación a $\text{kg}^{-0.75}$ o $\text{kg}^{-0.66}$ más que a kg^{-1} . Creemos que este aspecto, que ha sido obviado durante mucho tiempo, podría cuestionar muchas de las conclusiones a las que se han llegado en los estudios en los que no se ha tenido en consideración.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ECONOMÍA DE CARRERA

Siguiendo la clasificación de Frederick (1992), los factores que influyen en la economía de movimiento (EM) son extrínsecos o intrínsecos al sujeto. De los factores extrínsecos nos referiremos a los factores ambientales, al calzado y a la superficie. En cuanto a los factores intrínsecos, atenderemos a aquellos referidos a la variabilidad biológica tales como la antropometría, la raza, el sexo y la edad, mientras que en otro plano están aquellos factores propios de la biomecánica (cinéticos, cinemáticos, fisiología muscular), relacionados éstos últimos con parámetros muy útiles para el control y seguimiento del entrenamiento como la velocidad aeróbica máxima (VAM).

Factores Extrínsecos

Factores Ambientales

La velocidad absoluta del aire, que es la resultante entre el viento real y el viento de marcha (Aguado, 1993), es el factor ambiental que más influye en el rendimiento y, por ende, en la EC. La resistencia al aire aumenta con el cuadrado de la velocidad, lo que significa que a velocidades altas (p.e. VAM) su influencia es mayor.

Según Pugh (1970,1971) el VO_2 añadido debido a la resistencia al aire se incrementa con el cubo de la velocidad de carrera. Léger y Mercier (1984), revisando la cuestión, concluyeron que en pista, entre 8 y 25 $km \cdot h^{-1}$, el VO_2 ($ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$) = $3,5 * velocidad$ ($km \cdot h^{-1}$), para una población adulta a partir de las estimaciones del consumo de O_2 en tapiz rodante, añadidos al consumo determinado por Pugh (1971) para la resistencia contra el viento. De estos cálculos, resulta mayor la diferencia de la carrera en pista respecto de la carrera en tapiz rodante a partir de los 15 $km \cdot h^{-1}$. Al respecto de la equivalencia, señalar que, según Jones y Doust (1996), una inclinación en el tapiz rodante de un 1% con estadios de una duración de 5 min y a velocidades comprendidas entre 2,92 y 5 $m \cdot s^{-1}$ (10 $km \cdot h^{-1}$ y 18 $km \cdot h^{-1}$), equipara el consumo de oxígeno obtenido en las mismas condiciones en pista.



Figura 3. Grupo de corredores realizando el Test de Carrera en pista de la Universidad de Montreal con el ritmo impuesto por un ciclista.

Estas consideraciones tienen unas implicaciones prácticas interesantes. Davies (1980) estimó que el coste energético debido a la resistencia al aire supone entre un 4 y un 2% del VO_2 en carreras de media distancia y maratón, respectivamente. Este aspecto es de suma importancia en los planteamientos tácticos que se determinen en competición. Así, Pugh (1971) calculó que un atleta corriendo a 1 m por detrás de otro debería tener una reducción en el coste energético de aproximadamente un 6%. En un estudio posterior, Kyle (1979) determinó que un espacio de 2 m reduce el coste energético en un 3%. Además de esta estrategia, otros aspectos pueden influir en una mejor aerodinámica. Los experimentos que Kyle & Caiozzo (1986) realizaron en un túnel de viento muestran que, entre otros, la ropa floja, los calcetines y el pelo largo, son fuentes significativas de resistencia al aire, aunque no de forma muy importante, pues no

parecen incrementar en más de entre 5 y 15 segundos el tiempo en una maratón.

El Calzado

Se puede decir que un calzado más pesado produce un consumo de O₂ más elevado a razón de un 1% por 100g de peso añadido en cada zapatilla (Frederick, 1985). Por otro lado, Morgan et al. (1996) estimaron un coste energético menor (1,1%) en un modelo diseñado para potenciar el recobro de energía elástica respecto de otro modelo de peso similar, que se magnificaba cuanto mayor era la velocidad, aunque de forma no muy importante. Por lo tanto, y tal y como apunta Williams (1990), debe buscarse un equilibrio entre la tendencia a reducir el coste metabólico añadiendo propiedades de amortiguación, con el coste adicional resultante del peso añadido.

La superficie

Las cualidades que la superficie tenga para favorecer la eficiencia mecánica de la carrera, como son la elasticidad y la inclinación, pueden influir en la EC interactuando con el complejo músculo-tendinoso del atleta.

McMahon y Greene (1979) determinaron un rango de elasticidad de la superficie de la pista que incrementaba la velocidad de carrera en un 2-3% con un descenso del 50% de las lesiones. Basándose en este estudio, Kerdok et al. (2002) comprobaron que a 3.7 m•s⁻¹ (13,32 km•h⁻¹) en una plataforma con capacidad para regular la elasticidad del piso, un decremento del 12.5% suponía un descenso del 12% en el coste metabólico, con un incremento del 29% en la elasticidad del miembro inferior, sin alterar los parámetros mecánicos en el apoyo. En este sentido, Dixon et al. (2000) indican la existencia de una gran variabilidad individual en los mecanismos de adaptación cinemáticos de los sujetos a las diferentes elasticidades de la superficie. Según estos datos, parece que la rigidez de la superficie tiene más influencia que el calzado en la EC tal y como comprobaron Hardin et al. (2004), siendo más económica cuanto más dura es la superficie (Kerdok et al., 2002).

De reciente interés es el estudio del coste energético de la carrera en arena (Zamparo et al., 1992; Lejeune et al., 1998; Pinnington y Dawson, 2001; Pinnington et al., 2005). Como parece lógico, correr en la arena es menos económico que en otras superficies. Pinnington et al. (2005) atribuyen el mayor coste energético a los rangos de movimiento mayores en esta superficie.

Otro aspecto a tener en cuenta al considerar la superficie sobre la que se corre es la inclinación del piso. Según Svedenhag (2001), en la carrera cuesta arriba, en la que la masa corporal es más activamente transportada contra la gravedad, la captación de oxígeno puede estar, teóricamente, al menos, más relacionada a kg⁻¹ que a kg^{-0.75}. Contrariamente, el costo metabólico durante la carrera cuesta abajo es marcadamente más bajo que los costos asociados con la carrera en llano (Williams, 1990). Estas consideraciones cobran relevancia en las carreras de campo a través o en las de ruta, en las que los continuos toboganes pueden alterar la EC. Según Klein et al. (1997), parece que las inclinaciones de hasta un 5% durante 10 min a la velocidad al U_{AN} individual no afectan a la EC.

Factores Intrínsecos

Variabilidad Biológica

Con el término variabilidad biológica nos referiremos a todas aquellas variables antropométricas o fisiológicas vinculadas a la ontogénesis o a la filogénesis de los individuos. Así, puede ocurrir que algunas variables que pueden influir en algún grado en el rendimiento (p. e. la talla), tengan su origen tanto en condicionantes de tipo genético (raza, sexo) como madurativo (edad).

Los factores que expliquen el mayor rendimiento de los corredores de fondo africanos es un tema de gran controversia y probablemente el más recurrido en la literatura respecto de la influencia que la variabilidad biológica tiene sobre el rendimiento. En la década de los 90, el grupo del "Copenhagen Muscle Research Center", dirigido por B. Saltin, comenzó una serie de estudios para comparar el rendimiento entre corredores keniatas y escandinavos.

Así, Larsen (2003), en una revisión acerca de los posibles factores que explicasen la preponderancia de los corredores keniatas, se refiere a la posibilidad de que unas piernas más delgadas y alargadas que los corredores caucásicos, pudiesen suponer una ventaja. En este sentido, Martin y Morgan (1992), ya trataron la cuestión de cómo influye la distribución de la masa corporal, concluyendo que es menos costoso energéticamente añadir masa adicional en el tronco que en las extremidades, a razón de un incremento de un 1% en el tronco, un 3,5% en el muslo y un 7% en los pies por kilo de peso añadido. Recientemente, Lucía et al. (2006), encontraron una correlación inversa negativa entre la máxima circunferencia de la pantorrilla y el VO₂ a una velocidad fija de carrera (21 km.h⁻¹) en un grupo de corredores de alto nivel españoles y etíopes.

Respecto de la antropometría, Bergh (2003) plantea la hipótesis de si una talla más pequeña y un menor peso corporal pudiesen suponer también una ventaja tanto desde el punto de vista termodinámico, por suponer, una menor acumulación de calor, sin elevar el consumo de O₂ y la frecuencia cardiaca, como desde el punto de vista de la carga de entrenamiento, pues una menor masa corporal favorecería una mayor acumulación de volumen de entrenamiento de alta intensidad.

Coetzer et al. (1993), estudiando comparativamente diferentes parámetros fisiológicos, antropométricos y el entrenamiento en una población de corredores caucásicos y negros sudafricanos, ya advertían que los corredores de color eran más bajos y menos pesados con una masa magra mucho menor en los muslos que los corredores caucásicos. De entre todos los parámetros estudiados, la EC no explicaba el mejor rendimiento de los corredores negros y sí una menor concentración de lactato durante el ejercicio, además de detectar que éstos entrenaban más a intensidades mayores al 80% del VO₂ máx. De todas formas, otro estudio (Weston et al., 2000) en el que se comparaban a corredores sudafricanos caucásicos y negros de iguales características antropométricas –excepto una mayor talla de los blancos-, e iguales rendimientos en los 10 km, sugiere que sí son una mejor EC y una mayor fracción del consumo de oxígeno al ritmo de competición, asociado a un pico de consumo máximo de oxígeno menor, las potenciales diferencias que favorecen el mayor éxito de los corredores africanos.

Respecto de la antropometría, presentamos en la Tabla 1 un resumen de los factores propios de una buena EC, tal y como propone Anderson (1996).

Altura media o ligeramente más baja para los hombres pero ligeramente mayor que la media para las mujeres
Alto índice ponderal y físico ectomórfico o ectomesomórfico
Bajo porcentaje de grasa corporal
Morfología de la pierna que distribuye la masa próxima a la articulación de la cadera
Pelvis estrecha

Tabla 1. Factores antropométricos asociados a una mejor EC (Anderson, 1996)

Desde una perspectiva biológica, existen trabajos que han estudiado el costo de la locomoción en animales (Roberts et al., 1998a; Roberts et al., 1998b; Kram y Taylor, 1990). Según estos estudios, en lo referente al diseño de las extremidades y su relación con el peso corporal y el desarrollo de la fuerza para la locomoción, parece que un mayor volumen en las extremidades neutraliza el beneficio de una mejor economía asociada a unas tasas menores en la producción de fuerza. El modelo en el que se basa, determina que el consumo de energía es directamente proporcional al peso corporal e inversamente proporcional al tiempo de aplicación de la fuerza para la locomoción, de tal forma que los animales bípedos, que teóricamente tienen la ventaja de tener miembros más largos que proporcionan pasos más largos, usando fibras lentas más económicas, consumen más energía para una tasa de producción de fuerza determinada porque requieren un mayor volumen de volumen muscular para soportar su peso corporal. Evidencias desde esta perspectiva, pero en humanos (Wright y Weyand, 2001), confirman que las tasas metabólicas durante la carrera pueden determinarse a partir de las tasas de aplicación de fuerza en el suelo y el volumen de musculatura activada.

McCann y Adams (2003) determinaron un consumo de oxígeno a velocidades entre 1,6 y 3,1 m•s⁻¹ (5,76 y 11,16 km-1) mayor en niños que en adolescentes, y mayor en adolescentes que en adultos. Sin embargo, si se aplicaba el índice adimensional llamado “coste energético de locomoción independiente del tamaño” (size-independent cost of locomotion) (ml•kg⁻¹) (SIC), definido como la cantidad de oxígeno neta usada para mover la masa de 1 kg a una distancia igual a la estatura, hallaron un mayor consumo de oxígeno en adolescentes que en niños o adultos, siendo los valores de estos últimos similares. El análisis de los resultados con la literatura indica que el pico en el SIC alrededor de los 15 años coincide con los cambios en la relación entre la longitud de la pierna y la estatura. Debe hacerse notar que el “SIC” anula variables como el metabolismo en reposo y el efecto dimensional del peso y la estatura. Estas cuestiones y una amplísima discusión son abordadas por Saibane y Minetti (2003) en una revisión sobre la biomecánica y la fisiología de la locomoción humana. Estos autores concluyen que comparando a niños, pigmeos y enanos con sujetos normales, no se encuentran diferencias cuando la velocidad es expresada en términos dinámicamente equivalentes, como ya señalábamos respecto del “coste de locomoción independiente del tamaño” (McCann y Adams, 2003).

Una lógica consecuencia de estas conclusiones, en relación a las dimensiones corporales, es el estudio de la EC en niños y adolescentes, con vistas a comprender si estas diferencias son debidas a la antropometría, y si el crecimiento y el

desarrollo son factores a tener en cuenta en la evolución de la EC. Aquí hay que señalar la dificultad de atribuir a estos factores, y no a otros de tipo madurativo o entrenamiento, las diferencias encontradas, aunque sí es cierto que esta mejora aparece con y sin la presencia de entrenamiento de carrera. Krahenbuhl y Williams (1992) señalan como causantes de esta peor EC en niños, a unas mayores tasas metabólicas en reposo, un coste energético de la respiración mayor y unas frecuencias y amplitudes de zancada desventajadas a iguales velocidades. Rowland (1990), al respecto, añade que la comúnmente asumida peor EC en niños respecto de los adultos, que va mejorando con el crecimiento hasta el final del desarrollo, puede atribuirse, entre otros, a factores tales como el índice superficie/masa corporal, una mecánica de carrera inmadura, la relación fuerza-velocidad, o a diferencias en la aportación de energía por vía anaeróbica. Un estudio más reciente (Ariëns et al., 1997), que presenta la gran ventaja de estudiar la EC longitudinalmente en una población de 84 varones y 98 mujeres desde los 13 a los 27 años, corrobora una mejora en la EC con el paso de los años, señalando, además, a las chicas como poseedoras de una mejor EC que los chicos.

Un caso especial es el trabajo de Allor et al. (2000) que emparejaron a chicas adolescentes y mujeres de igual antropometría y VO_2 máx. con el objetivo de determinar las diferencias en la EC. La mejor EC en las mujeres se pudo explicar en parte con un consumo de oxígeno pre-ejercicio menor, además de encontrar unas FC y frecuencia respiratoria mayores en las chicas, pero que no explicaban las diferencias encontradas entre ambos grupos.

La diferencia en la EC entre sexos, es relevante en cuanto que, hasta ahora, la mayoría de los estudios determinaban, según Daniels y Daniels (1992), o igualdad entre sexos, o una mejor EC en los hombres. Al respecto, es complicado determinar si las posibles diferencias son de tipo antropométrico o están implicados otros factores como, por ejemplo, el ciclo menstrual (Williams y Krahenbuhl, 1997). Con todo esto en mente, un estudio realizado con maratonianos de ambos sexos noruegos de nivel similar (Helgerud, 1995), en el que se controla la influencia del peso corporal en el consumo de oxígeno, indica que los VO_2 máx. y U_{AN} superiores en los hombres se ven compensados por una mejor EC en las mujeres, lo que les permite correr la prueba a una fracción mayor del consumo de O_2 .

Por último, es reseñable y original el estudio de Maldonado et al. (2002), en el que se estudia el Cr relacionado con la masa corporal y la talla en corredores de diferentes especialidades. Este trabajo encontró un Cr y un VO_2 máx. mayores en los corredores de medio fondo largo (5000-10000 m) comparado con los de medio fondo corto y maratón en un test progresivo máximo en tapiz rodante. Asimismo, determinaron unas correlaciones del Cr con la altura ($r = -0,86$, $p < 0,001$) y la masa corporal ($r = -0,77$, $p < 0,01$), pero sólo en el grupo de medio fondo corto, con lo que concluyen que las características antropométricas relacionadas con un buen rendimiento son diferentes en las distancias de fondo largo y medio fondo.

Factores Biomecánicos

Según Bailey y Messier (1991), de todos los factores biomecánicos que parecen influir de alguna manera en la EC, según los estudios empíricos, la longitud de zancada es el más importante. Al respecto, Williams (1990) señala que, en general, no han aparecido evidencias que indiquen que unas longitudes de zancada más cortas o más largas, en términos absolutos o relativos, se puedan asociar con una peor o mejor EC, aunque esto no quiere decir que este parámetro tenga su influencia con el gasto energético. En este sentido, parece que los corredores son más económicos con la amplitud de paso elegida libremente para cada velocidad, y no con amplitudes acortadas o alargadas (Morgan et al., 1994).

En la revisión sobre la influencia de los factores biomecánicos en la EC, Anderson (1996) (ver Tabla 2) concluye que las relaciones de los diferentes parámetros biomecánicos son por lo general pobres e inconsistentes. Al respecto, Williams (1990) plantea que es posible que la economía resultante en un individuo dependa de la influencia de un gran número de variables mecánicas, tanto económicas como no económicas, y que incluso cuando un individuo muestra características aparentemente relacionadas con una economía pobre, basada en resultados de grupos de corredores, sí hay razones para no pesar que esas mismas características son, de hecho, económicas para ese individuo. Así, Kyröläinen et al. (2001), valoraron la EC en 17 jóvenes corredores a 12-13 velocidades diferentes, desde los $3,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a los $6,50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($11,70$ y $23,4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), estudiando, al mismo tiempo, variables cinemáticas, cinéticas y relativas a la actividad eléctrica de la musculatura, no pudieron identificar ningún factor que explicase la EC de forma exclusiva.

Oscilación vertical pequeña del centro de masas
Ángulo más pequeño de la rodilla durante el balanceo de la pierna libre
Menor grado de movimiento pero mayor velocidad angular de la flexión plantar durante el despegue del pie
Movimiento de brazos de menor amplitud
Picos bajos de las fuerzas de reacción al suelo
Rotación de los hombros más rápidas en el plano transversal
Mayor ángulo de recorrido de las caderas y hombros sobre el eje longitudinal y el plano transversal

Tabla 2. Factores biomecánicos asociados a una mejor EC. (Anderson, 1996)

Tipología de las Fibras Musculares

Parece que, según Coyle et al. (1992) y Horowitz et al. (1994), existe una mayor eficiencia de las fibras tipo I en el rendimiento en resistencia en cicloergómetro. Esto sugiere una mayor eficiencia de las fibras lentas, explicada por una mayor capacidad de estas fibras de acumular energía elástica a velocidades bajas. Williams y Cavanagh (1987), al respecto, ya habían encontrado que los corredores más económicos, al comparar tres grupos según si su EC era alta, media o baja, exhibían una tendencia a poseer mayor número de fibras tipo I, aunque la correlación no resultó ser significativa. Lo contrario se fundamenta en el estudio de Bosco et al. (1987), que hallaron una correlación positiva entre el porcentaje de fibras tipo II y el costo energético de la carrera. Más reciente, el estudio de Kyröläinen et al. (2003) en el que evaluaron la EC de diez jóvenes corredores de medio fondo, revela una correlación entre el gasto energético y la cantidad de isomorfos tipo II de la cadena pesada de la miosina, corriendo a las velocidades próximas a la de competición ($7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 25,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$).

El "Stiffness"

Siguiendo con la explicación mecánica del retorno de energía elástica, nos merece especial atención el modelo "Leg Spring" ("Pierna-Muelle") propuesto por McMahon y Cheng (1990) y aplicado a la demanda aeróbica de la carrera por Heise y Martin (1998) y Dalleau et al. (1998). Dicho modelo atribuye al sistema músculo-esquelético del atleta las propiedades de un muelle lineal con la masa equivalente a la masa corporal del sujeto, y predice y describe relativamente bien la mecánica de la carrera. Según el trabajo de Heise y Martín (1998) en la que se correlacionó la demanda aeróbica de 16 corredores aficionados con diferentes parámetros relativos al modelo, la relación inversa hallada entre K_{vert} , es decir, el "stiffness" efectivo vertical normalizado (el índice entre la fuerza y el desplazamiento vertical del centro de masas, en el momento en que el centro de masas alcanza su punto más bajo), y la demanda aeróbica de la carrera ($r = -0,48$), indica que los corredores menos económicos poseen un estilo de carrera más "blando" durante el contacto con el suelo. Estos resultados están en consonancia con Dalleau et al. (1998) que determinaron una correlación más elevada ($r=0,80$; $p<0,05$) entre el "stiffness" y el Cr en un grupo de ocho mediofondistas de nivel regional.

Previamente, He et al. (1991) ya determinaron un aumento del "stiffness" vertical con el incremento de la velocidad, aunque no varíe apenas con la disminución de la gravedad. Este dato viene reforzado por la conclusión a la que llegan Farley y González (1996) en el que, aplicando dicho modelo, concluyen que el ajuste más importante que el sistema realiza para acomodarse a frecuencias de carrera mayores, es el aumento de la elasticidad de la pierna, es decir, del "stiffness". Además, otros estudios (Bourdin et al., 1993; Greene y McMahon, 1979) han demostrado un incremento del "stiffness" de la musculatura de las piernas con el incremento del peso corporal. En concreto, Bourdin et al. (1993), revelaron un decremento significativo del Cr con un incremento de la masa corporal del 9,3%. En la condición de sobrecarga, encontraron una actividad mayor del bíceps femoral y del gastrocnemio lateral durante la fase excéntrica del apoyo, lo que podría provocar una mejora del "stiffness" de la pierna en esta fase, asociándose a un incremento significativo de la frecuencia de zancada.

El hecho de que el "stiffness" vertical sea más decisivo a la hora de mejorar la EC, se refuerza con el hecho de que el costo metabólico para generar fuerzas durante la carrera humana es, según Chang y Kram (1999), de dos tercios para generar las fuerzas verticales frente a un tercio para las fuerza horizontales. Además, según Heise y Martin (2001), el impulso vertical total y el neto, son las únicas fuerzas de reacción del suelo que correlacionan ($r = 0,62$ y $r = 0,60$, respectivamente) con la EC, lo que puede estar relacionado con un requerimiento mayor de masa muscular en el apoyo, en 16 corredores aficionados a una velocidad de $3,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($12,06 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$).

Esta influencia de la elasticidad del corredor se relaciona de forma inversa con la influencia que algunos trabajos han encontrado entre algunas medidas de flexibilidad, como la dorsiflexión y la rotación de la cadera (Craib et al., 1996), o el test de "seat and reach" (Jones, 2002) y la EC. La explicación defendida por estos autores alude a un mejor retorno de energía elástica potenciado por una peor flexibilidad de las estructuras músculo-tendinosas del miembro inferior, lo que estaría relacionado con un mayor "stiffness", contribuyendo además, con la reducción del trabajo de la musculatura estabilizadora. Aún así, un entrenamiento de flexibilidad durante diez semanas ha demostrado no influir en la EC a pesar de haber mejorado el rendimiento en el "seat and reach" (Nelson et al., 2001).

Velocidad de Carrera

Según Kyröläinen et al. (2001), los corredores que son más económicos a una velocidad determinada, son más económicos, por lo general, a velocidades mayores. Kaneko et al. (1985), a su vez, hallaron un nivel de eficiencia mayor en los fondistas respecto de los velocistas, a velocidades menores de $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($25,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), al mismo tiempo que esta relación se truncaba a velocidades mayores, lo que parece indicar una cierta especificidad en la relación entre la EC y la especialidad deportiva. Según Williams (1990), lo interesante es valorar a los sujetos en un rango de velocidades y proceder con un análisis de regresión en términos de economía. Lo cierto es que, como indica Noakes (2001), los atletas difieren, en la tasa de consumo de oxígeno a cualquier velocidad, y además, en la velocidad pico de carrera, con lo que de la interacción de estos dos parámetros resultan unas curvas de EC peculiares en cada corredor. Más recientemente, Peroni Ranchet et al. (2006), después de revisar la literatura y tras una serie de experimentos con diferentes poblaciones de corredores, concluyeron que, a pesar de que existe una gran variabilidad en el Cr, es el incremento de Cr con el aumento de la velocidad lo que caracteriza a los corredores de fondo bien entrenados, sugiriendo que el Cr se debe obtener a velocidades específicas de competición, pero sin otorgarle ningún valor predictivo.

En este sentido, la velocidad aeróbica máxima (VAM), definida como "la mínima velocidad necesaria para alcanzar el VO_2 máx. en una prueba progresiva" (Billat et al., 1994), es un parámetro muy útil para la valoración de los corredores de resistencia si tenemos en cuenta que en el mismo concepto podemos integrar el VO_2 máx. y la EC, tal y como sugieren Tuimil et al. (2001), que encontraron en la ejecución de la prueba progresiva en pista de la Universidad de Montreal (UMTT) (Léger y Boucher, 1980) unos tiempos de contacto menores en el grupo de corredores, con una VAM individual mayor respecto del grupo de no corredores deportistas entrenados en resistencia, teniendo ambos grupos un VO_2 máx. similar. Estos autores sugieren como mecanismo explicativo una mejor eficiencia de carrera, lo que sugiere la influencia de los factores neuromusculares en el rendimiento en carreras de fondo y mediofondo, tal y como se ha sugerido en la literatura reciente (Paavolainen et al., 1999; Nummela et al., 2006). La VAM es un parámetro muy válido para identificar diferencias aeróbicas entre varios corredores y categorías de corredores (Billat y Koralsztejn, 1996) y su utilidad para el control y la prescripción del entrenamiento ha sido suficientemente contrastada (Tuimil y Rodríguez, 2003). Además, la VAM obtenida con el UMTT ha demostrado ser un aceptable predictor del rendimiento en corredores de fondo de diferentes edades y niveles de rendimiento (Lacour et al., 1989; 1991; Billat et al., 2003; Boullosa y Tuimil, 2004; 2005).

EC Y ENTRENAMIENTO

Morgan y Craib (1992), en la revisión que presentan sobre el efecto de diversos tipos de entrenamiento, ya avisan de lo equivoco de los resultados presentados por los diferentes autores, por la gran cantidad de variables implicadas y la dificultad a la hora de poder comparar unos trabajos con otros, además de las limitaciones metodológicas inherentes. Estos autores encontraron estudios que han conseguido modificar la EC con diversos tipos de entrenamiento, no pudiendo definir los mecanismos implicados, pues hasta ese momento no existían evidencias que confirmasen la validez o no de las hipótesis explicativas. Lo que sí parece más claro es, según Daniels y Daniels (1992), la pertinencia de la evaluación de la EC en la velocidad específica de competición, pues los corredores de medio fondo parecen ser más económicos que los de fondo largo a velocidades mayores y viceversa, con lo que, a la hora de interpretar los resultados, es necesaria una caracterización más precisa de la población estudiada. En este sentido, parece que la EC puede ser mejorada predominantemente en la velocidad empleada en el entrenamiento (Beneke & Hütler, 2005).

El primer estudio (Paavolainen et al., 1999) que ha propiciado la aparición de evidencias que respaldan la hipótesis de la potencia muscular (Noakes, 1988), determinaron mejoras en la EC y el rendimiento en 5 km, en 10 corredores de campo a través, mediante un entrenamiento de fuerza explosiva basado en saltos y carreras de velocidad, demostrando que la mejora de las características neuromusculares en corredores de fondo es altamente efectiva. En este mismo experimento mejoraron la VMART (velocidad en el test máximo de carrera anaeróbico), cuyo rendimiento viene determinado por la capacidad y potencia anaeróbicas y las características neuromusculares (Rusko y Nummela, 1996). Además, estos cambios no fueron acompañados de mejora en el consumo máximo de oxígeno en el grupo experimental, aunque sí en el grupo control. Con este trabajo, quedaba por primera vez demostrada la efectividad de un entrenamiento de este tipo en la EC,

aunque ya había sido sugerido previamente por otros autores en estudios de tipo descriptivo (Bulbulian et al., 1986; Houmard et al., 1991). La influencia de los factores neuromusculares en el rendimiento en resistencia y en la EC en una muestra de corredores bien entrenados ha sido constatada recientemente por Nummela et al. (2006).

Es a partir de este primer trabajo cuando surgen otros que, basados en la potenciación de las características neuromusculares, consiguen mejorar la EC. Así, los trabajos de Turner et al. (2003), Spurrs et al. (2003) y Saunders et al., (2006), confirman la efectividad de un entrenamiento de tipo pliométrico a la hora de mejorar la EC. Turner et al. (2003), con un entrenamiento de saltos, sentadillas y carrera en cuesta, durante seis semanas, mejoraron la EC en 18 corredores entrenados en resistencia sin cambios en el VO_2 máx.. En este estudio, sin embargo, no pudieron determinar el mecanismo implicado ya que no hubo mejora en la altura de los test de salto ni en variables relacionadas con la eficiencia. En otro trabajo, Spurrs et al. (2003), mejoraron la EC y el rendimiento en 3000 m en 17 corredores varones con un entrenamiento pliométrico de 6 semanas, consistente en diferentes tipos de saltos. Aquí tampoco hubo cambios ni en el VO_2 máx. ni en el umbral anaeróbico, sugiriendo la mejora del "stiffness" musculotendinoso como mecanismo explicativo. El estudio de Saunders et al. (2006) ha sido el primero en demostrar la efectividad de un entrenamiento pliométrico en un grupo de corredores de alto nivel, ya que ha obtenido mejoras en la EC, sin variación en el VO_2 máx. u otros parámetros cardiorrespiratorios, debido a mecanismos musculares o incluso, aunque sin demostrar, a una influencia en la mecánica de carrera, tal y como sugieren estos autores.

Otro tipo de estudio es el publicado por Millet et al. (2002) en el que observaron los cambios en la cinética del consumo de oxígeno y la EC en 15 triatletas que realizaron aleatoriamente, o un entrenamiento de fuerza y resistencia simultáneo, o un entrenamiento de resistencia sólo. Es interesante señalar que el entrenamiento fue definido por los investigadores como de fuerza máxima (3-5 series de 3-5 repeticiones al fallo) y duró unas 14 semanas. Los resultados fueron una mejora de la fuerza máxima, la EC y la potencia de salto, no afectando ni al VO_2 máx., el "stiffness" de la pierna o la cinética de oxígeno. Los autores indican que los factores limitantes en deportistas entrenados en resistencia son más de tipo local/periférico que central, sugiriendo que el reclutamiento de unidades motoras de tipo II, como consecuencia de una mejora de la fuerza máxima, si la frecuencia de zancada permanece invariable, como así sucedió en este experimento, permite un pico de tensión relativo menor en cada ciclo, volviéndose de esta manera más eficiente el movimiento. Este mecanismo ya fue determinado por Hoff et al. (1999) en una mejora de la economía de trabajo en ergómetro, en 15 esquiadoras que realizaron un entrenamiento de fuerza máxima durante 9 semanas. Además de una reducción en la carga relativa, Hoff et al. (1999) encontraron una anticipación del tiempo del pico de fuerza, sin cambios en el umbral anaeróbico, mejorando significativamente ($p < 0.001$) el tiempo hasta la extenuación.

Además de estos últimos estudios en los que se observa una mejora de la EC mediante el entrenamiento de los factores neuromusculares, existen otro tipo de trabajos que nos apuntan estrategias diferentes y originales. Mencionaremos a Caird et al. (1999) que consiguieron una mejora en la EC mediante entrenamiento con "biofeedback" consistente en técnicas de relajación y control de variables fisiológicas tales como el V_{O_2} , la FC o el VE (ventilación pulmonar), intentando reducirlas durante el entrenamiento de EC al 70% de la VAM. Los siete corredores de fondo participantes consiguieron mejorar estas variables y la EC, sin modificar otros parámetros fisiológicos.

Por otro lado, y referidos a la VAM, citaremos el trabajo de Franch et al. (1998) en el que la mejora de la EC se relaciona con una reducción de las demandas ventilatorias (VE) ($r = 0.77$; $p < 0.0001$), resultando muy efectivos tanto el método continuo como el interválico largo, mientras el interválico corto fracasaba. Estas mejoras se acompañaron de una mejora de la VAM en estos dos métodos, y el Tlim (tiempo límite) en los tres métodos empleados, permaneciendo inalteradas variables cinemáticas y la composición muscular. En la misma línea, Billat et al. (1999), empleando un entrenamiento interválico a la VAM durante cuatro semanas, a razón de una sesión por semana, mejoraron la EC, la VAM, y disminuyeron la FC submáxima, en ocho atletas entrenados en resistencia, sin alterar el Tlim y el umbral de lactato.



Figura 4. Atleta realizando una prueba para la determinación del tiempo límite a la VAM

Por último, respecto del entrenamiento en altitud, Foster y Lucía (2007) señalan que, aunque no existe todavía un consenso acerca del efecto de la altitud en la EC sin tener en cuenta el tipo de entrenamiento, parece que podría tener su influencia en que la única forma de tolerar el entrenamiento y mantener los ritmos de carrera en estas condiciones, sería volviéndose más eficiente.

CONCLUSIONES

La EC ha resultado ser un factor muy importante a la hora de discriminar el rendimiento, habida cuenta de las limitaciones de los otros parámetros clásicos (VO_2 máx. y U_{AN}) para discriminar el nivel de los corredores, asociándose a factores de muy diversa naturaleza, lo que nos advierte de su complejidad.

Por lo tanto, aunque son muchas las limitaciones y exigencias metodológicas que se presentan en su valoración, parece fundamental su consideración a la hora de valorar el entrenamiento y el rendimiento en carreras de fondo, si se dispone de la tecnología necesaria.

Desde un punto de vista práctico, un parámetro como la VAM, que integra en un mismo concepto el VO_2 máx. y la EC, unido a su fácil valoración con protocolos de campo tales como el UMTT, además de poseer un aceptable valor predictivo, presenta de una gran utilidad en la prescripción y control del entrenamiento.

REFERENCIAS

1. Aguado, X (1993). Eficacia y técnica deportiva. *Barcelona: Inde*
2. Allor, K.M., Pivarnik, J.M., Sam, L.J., and Perkins (2000). readmill economy in girls and women matched for height and weight. *J. Appl. Physiol.* 89: 512-516
3. Anderson, T (1996). Biomechanics and running economy. *Sports Medicine.* 22: 76-89
4. Bailey, S.P., and Messier, S.P (1991). Variations in stride length and running economy in male novice runners subsequent to a seven-week training program. *Int. J. Sports Med.* 12 (3): 299-304
5. Bassett, D.R. JR., and Howley, E.T (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 32(1): 70-84
6. Berg, K (2003). Endurance training and performance in runners. *Sports Medicine.* 33(1): 59-73
7. Billat, V., Bernard, O., Pinoteau, J., Petit, B. y Koralsztein, J.P (1994). Time to exhaustion at and lactate steady state velocity in sub-elite long-distance runners. *Archives International of Physiology, Biochemistry and Biophysique.* 102, (4) 215-219
8. Billat, V.L., Flechet, B., Petit, B., Muriaux, G., and Koralsztein, J-P (1999). Interval Training at : effects on aerobic performance and overtraining markers. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31(1): 156-163

9. Billat, V. y Koralsztein, J.P (1996). Significance of velocity at and time to exhaustion at this velocity. *Sports Medicine*, 22 (2), 90-108
10. Billat, V., Lepretre, P.M., Heugas, A.M., Laurence, M.H., Salim, D., and Koralsztein, J.P (2003). Training and Bioenergetic Characteristics in elite male and female Kenyan runners. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 35(2): 297-304
11. Billat, V., Sirvent, P., Py, G., Koralsztein, J-P., and Mercier, J (2003). The concept of Maximal lactate steady state. A bridge between bichemistry, Physiology and Sport Science. *Sports Medicine* 33(6): 407-426
12. Bosco, C., Montanari, G., Ribacchi, R. et al (1987). Relationship between the efficiency of muscular work during jumping and the energetics of running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 56(2):138-143
13. Boullosa, D.A. y Tuimil, J.L (2004). Relación entre la velocidad aeróbica máxima y el rendimiento en 1000m. En: *Lera Navarro, A. y Estévez Mengotti, J. (Eds.). Actas del XXII Congreso Nacional de Educación Física*, p. 27. A Coruña: Universidade da Coruña
14. Boullosa, D.A. y Tuimil, J.L (2005). Relación entre la velocidad aeróbica máxima de carrera y el rendimiento en pruebas atléticas de resistencia en atletas jóvenes. En: *Universidad Europea de Madrid (Ed.). Actas del I Congreso Internacional UEM*, p. 940. Madrid: Gymnos
15. Bourdin, M., Belli, A., Laurent, M., Arsac, and Lacour, J.R (1993). Mechanical effect of loading on energy cost of running. En *Huiskes, R. and Brand, A. (Eds.). Pág. 657. Abstracts of the XIVth ISB Congress: Paris*
16. Bulbulian, R., Wilcox, A.R., and Darabos, B.L (1986). Anaerobic contribution to distance running performance of trained cross-country athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 18: 107-113
17. Caird, S.J., McKenzie, A.D., and Sleivert, G.G (1999). Biofeedback and relaxation techniques improve running economy in sub-elite long distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31(5): 717-722
18. Cavanagh, P.R., and Williams, K.R (1982). The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running. *Med. Sci. Sports Exerc.* 14: 30-35
19. Chang, Y-H., and Kram, R (1999). Metabolic cost of generating horizontal forces during human running. *J. Appl. Physiol.* 86(5): 1657-1662
20. Coetzer, P., Noakes, T.D., Sanders, B., Lambert, M.I., Bosch, A.N., Wiggins, T., and Dennis, S.C (1993). Superior fatigue resistance of elite black South African distance runners. *Superior fatigue resistance of elite black South African distance runners*
21. Coyle, E., Sidossis, L.S., Horowitz, J.F., Beltz, J.D (1992). Cycling efficiency is related to the percentage of Type I muscle fibers. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24: 782-788
22. Coyle, E., Sidossis, L.S., Horowitz, J.F., Beltz, J.D (1996). The association between flexibility and running economy in sub-elite male distance runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 28(6): 737-43
23. Dalleau, G., Belli, A., Bourdin, M., and Lacour, J.R (1998). The spring-mass model and the energy cost of treadmill running. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 77: 257-263
24. Daniels, J.A (1985). A Physiologist's view of running economy. *Medicine & Science in Sports & Exercise.* 17: 332-338
25. Daniels, J., and Daniels, N (1992). Running economy of elite male and elite female runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24(4): 483-489
26. Davies, C.T.M (1980). Effects of wind assistance and resistance on the forward motion of a runner. *Journal of Applied Physiology* 48(4): 702-709
27. Dixon, S.J., Collop, A.C., and Batt, M.E (2000). Surface effects o ground reaction forces and lower extremity kinematics in running. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 32(11): 1919-1926
28. Franch, J., Madsen, K., Djurhuss, M.S., and Pedersen, P.K (1998). Improved running economy following intensified training correlates with reduced ventilatory demands. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 30(8): 1250-1256
29. Frederick, E.C (1985). The energy cost of load carriage on the feet during running. En *Winter, D.A., Norman, R.W., Wells, R.P., Hayes, K.C., and Patla, A. (Eds.). Biomechanics IX-B. Champaign: Human Kinetics*
30. Frederick, E.C (1992). Economy of Movement and Endurance Performance. En *Shephard R.J. y Åstrand, P.O. (Eds.) Endurance in Sports (179-185). Oxford: Blackwell Scientific Publications*
31. Gaesser, G.A., and Poole, D (1996). The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 24: 35-70
32. Greene, P.R., and McMahon, T.A (1979). Reflex stiffness of man's anti-gravity muscles during knee bends while carrying extra weights. *J. Biomech.* 12: 881-891
33. Hardin, E., Van den Bogert, J., and Hamill, J (1999). Kinematic adaptations during running: effects of footwear, surface and duration. *Science & Sports*, 14: 59-70
34. Heise, G.D., and Martin, P.E (1998). "Leg spring" characteristics and the aerobic demand of running. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 30(5): 750-4
35. Heise, G.D., and Martin, P.E (2001). Are variations in running economy in humans associated with ground reaction force characteristics. *Eur. J. Appl. Physiol.* 84: 438-442
36. Hausswirth, C, and Brisswalter, J (1999). Le coût énergétique de la course à pied de durée prolongée: étude des paramètres d'influence. *Science & Sports*, 14: 59-70
37. Helgerud, J (1995). Consumo máximo de oxígeno, umbral anaeróbico y economía de carrera en hombres y mujeres con un nivel similar de rendimiento en maratón. *Actas del Congreso Científico Olímpico. Bioquímica, Fisiología del ejercicio y Medicina del Deporte. Vol. IV: Malaga*
38. Hill, A.V., and Lupton, H (1923). Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *Quarterly Medical Journal* (16): 135-171
39. Horowitz, J.F., Sidossis, L.S., and Coyle, E.F (1994). High efficiency of type I muscle fibers improves performance. *Int. J. Sports. Med.* 15 (3): 152-157
40. Houmard, J.A., Costill, D.L., Mitchell, J.B., Park, S.H., and Chenier, T.C (1991). The role of anaerobic ability in middle distance running performance. *The role of anaerobic ability in middle distance running performance*
41. Kaneko, M., Fuchimoto, I.T., Shishikura, I.T., and Toyooka, J (1985). En *Winter, D.A., Norman, R.W., Wells, R.P., Hayes, K.C., and Patla A. Proceedings of the IX Int. Congress of Biomechanics. (307-312). Waterloo, Ontario, Canada*
42. Kaneko, M., Fuchimoto, I.T., Shishikura, I.T., and Toyooka, J (1985). Influence of running speed on the mechanical efficiency of

- sprinters and distance runners. *Proceedings of the IX Int. Congress of Biomechanics*. (307-312). Waterloo, Ontario, Canada.
43. Keefer, D.J, Tseh, W., Caputo, J.L., Craig, I.S., Martin, P.E., and Morgan, D.W (2000). Stability of running economy in young children. *Int. J. Sports Med.*, 21: 583-85
 44. Klein, R.M., Potteiger, J.A., and Zebas, C.J (1997). Metabolic and biomechanical variables of two incline conditions during distance running. *Med. Sci. Sports Exerc.* 29(12): 1625-1630
 45. Larsen, H.B (2003). Kenyan dominance in distance runners. *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.*, 136(1): 161-70
 46. Lejeune, T.M., Willems, P.A., and Heglund, N.C (1998). Mechanics and energetics of human locomotion on sand. *J. Exp. Biol.* 201: 2071-2080
 47. Jones, A.M (2002). Running economy is negatively related to sit-and-reach test performance in international-standard distance runners. *Int. Journal of Sports Med.* 23(1): 40-43
 48. Jones, A.M, and Doust, J.H (1996). A 1% treadmill grade most accurately reflects the energy cost of outdoor running. *J. Sports Sci.* 14(4): 321-327
 49. Kerdok, A.E., Biewener, A.A., McMahon, T.A., Weyand, P.G, Herr, H.M (2002). Energetics and mechanics of human running on surfaces of different stiffnesses. *J. Appl. Physiol.*, 92(2): 469-78
 50. Krahenbuhl, G.S., and Williams, T.J (1992). Running economy: changes with age during childhood and adolescence. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24(4): 462-466
 51. Kram, R., and Taylor, C.R (1990). Energetics of running: a new perspective. *Nature* 346: 265-267
 52. Kyle, C.R (1979). Reduction of wind resistance and power output of racing cyclists and runners travelling in groups. *Ergonomics* 22(4): 387-397
 53. Kyle, C.R., and Caiozzo, V.J (1986). The effect of athletic clothing aerodynamics upon running speed. *Med. Sci. Sports Exerc.* 18(5): 509-15
 54. Martin, P.E., and Morgan, D.W (1992). Biomechanical considerations for economical walking and running. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24(4): 467-474
 55. McCann, D.J., and Adams, W.C (2003). The size-Independent Oxygen Cost of Running. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 35(6): 1049-1056
 56. McCardle, W.D., Katch, F.L., and Katch, V.L (1990). Fisiología del ejercicio. Energía, nutrición y rendimiento humano. (1ª ed.). Madrid: Alianza Editorial
 57. McMahon, T.A., and Cheng, C.G (1990). The mechanics of running: how does stiffness couple with speed. *J. Biomech.* 23: 65-78
 58. McMahon, T.A., and Greene, P.R (1979). The influence of track compliance on running. *J. Biomech.* 12(12): 893-904
 59. Millet, G.P., Borrani, J.F., and Candau, R (2002). Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and kinetics. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34(8): 1351-1359
 60. Morgan, D.W., Bransford, D.R., Costill, D.L., Daniels, J.T., Howley, E.T., and Krahenbuhl, G.S (1995). Variation in the aerobic demand of running among trained and untrained subjects. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 27(3): 404-9
 61. Morgan, D.W., and Craib, M (1992). Physiological aspects of running economy. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 24(2): 456-461
 62. Morgan, D.W., Craib, M.W., Krahenbuhl, G.S., Woodall, K., Jordan, S., Filarski, K., Burleson, C., and Williams, T (1994). Daily variability in running economy among well-trained male and female distance runners. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 65(1): 72-77
 63. Morgan, D., Martin, P., Craib, M., Caruso, C., Clifton, R., and Hopewell, R (1994). Effect of step length optimisation on the aerobic demand of running. *J. Appl. Physiol.* 77(1): 245-251
 64. Morgan, D.W., Martin, P.E., Krahenbuhl, G.S., and Baldini, F.D (1991). Variability in running economy and mechanics among trained male runners. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 23(3): 378-383
 65. Morgan, D.W., Miller, T.A., Mitchell, V.A., and Craib, M.W (1996). Aerobic demand of running shoes designed to exploit energy storage and return. *R.Q.E.S.* 67(1): 102-105
 66. Moritz, C.T., Farley, C.T (2005). Human hopping on very soft elastic surfaces: implications for muscle pre-stretch and elastic energy storage in locomotion. *J. Exp. Biol.* 208: 939-949
 67. Nelson, A.G., Kokkonen, J., Eldredge, G., Cornwell, A., Glickman-Weiss, E (2001). Chronic stretching and running economy. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 11: 260-265
 68. Noakes, T.D (1988). Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a contemporary perspective. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 20 (4): 319-330
 69. Noakes, T (2001). Physiological capacity of the elite runner. *Running and Science. An interdisciplinary Perspective (19-48)*. Copenhagen: Institute of Exercise and Sport Sciences, University of Copenhagen.
 70. Novacheck, T.F (1998). The biomechanics of running. *Gait and Posture* 7: 77-95
 71. Nummela, A.T., Paavolainen L.M., Sharwood, K.A., Lambert, M.I., Noakes, T.D., Rusko, H.K (2006). Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 97, 1-8
 72. Pereira, M.A., and Freedson, P.S (1997). Intraindividual variation of running economy in highly trained and moderately trained males. *International Journal of Sports Medicine* 18(2): 118-124
 73. Peroni Ranchet, F., Mognoni, P., Impellizzeri, F (2006). Does cost of running depend of speed. *Sports Sci. Health*, 1: 97-103
 74. Pinnington, H.C., and Dawson, B (2001). Running economy on elite surf iron men and male runners, on soft dry beach sand and grass. *Eur. J. Appl. Physiol.* 86: 62-70
 75. Pinnington, H.C., Lloyd, D.B, Besier, T.F., Dawson, B (2005). Kinematic and electromyography analysis of submaximal differences running on a firm surface compared with soft, dry sand. *Eur. J. App. Physiol.*, 94(3): 242-53
 76. Prampero Di, P.E (1981). Energetics of muscular exercise. *Rev. Physiol. Pharmacol.* 89: 143-222
 77. Prampero Di, P.E (1986). The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int. J. Sports Med.*, 7: 55-72
 78. Pugh, L.G.C.E (1970). Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance. *Journal of*

79. Pugh, L.G.C.E (1971). The influence of wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of work against horizontal or vertical forces. *Journal of Physiology (Lond) 213: 255-276*
80. Roberts, T.J., Chen, M.S., and Taylor, C.R (1998). Energetics of bipedal running. II. Limb design and running mechanics. *Journal of Exp. Biol. 201: 2753-2762*
81. Roberts, T.J., Kram, R., Weyand, P.G., and Taylor, C.R (1998). Energetics of bipedal running. I. Metabolic cost of generating force. *Journal of Exp. Biol. 201: 2745-2751*
82. Roecker, K., Schotte, O., Niess, A.M., Horstmann, T., and Dickhuth, H.H (1998). Predicting competition performance in long-distance running by means of a treadmill test. *Med Sci Sports Exerc 30(10): 1552-7*
83. Rowland, T.W (1996). Exercise and Children's Health. Champaign, IL: Human Kinetics. Rusko, H.K., and Nummela, A.T. (1996). Measurements of maximal and submaximal anaerobic power. *Int. J. Sports Med. 17(S2): 89-130*
84. Rusko, H.K., and Nummela, A.T (1996). Measurements of maximal and submaximal anaerobic power. *Int. J. Sports Med. 17(S2): 89-130*
85. Saibene, F., and Minetti, A.E (2003). Biomechanical and physiological aspects of legged locomotion in humans. *Eur. J. Appl. Physiol. 88: 297-316*
86. Saunders, P.U., Pyne D.B., Telford, R.D., and Hawley, J.A (2004). Reliability and variability of running economy in elite distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc., 36(11): 1972-6*
87. Saunders, P.U., Telford, R.D., Pyne, D.B., Peltola, E.M., Cunningham, R.B., Gore, C.J., and Hawley, J.A (2006). Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *J. Strength and Conditioning Research, 20(4): 947-954*
88. Spurrs, R.W., Murphy, A.J., and Watsford, M.L (2003). The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur. J. Appl. Physiol. 89: 1-7*
89. Svedenhag, J (2001). Running Economy. *Running and Science. An interdisciplinary Perspective (85-108). Copenhagen: Institute of Exercise and Sport Sciences, University of Copenhagen*
90. Turner, A.M., Owings, M., and Schwane, J.A (2003). Improvements in running economy after 6 weeks of plyometric training. *J. Strength and Conditioning Research 17(1): 60-67*
91. Weston, A.R., Mbambo, Z., and Myburgh, K.H (2000). Running economy of african and caucasian distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc., 32(6): 1130-4*
92. Williams, K.R (1990). Relationship between distance running biomechanics and running economy. *En Cavanagh, P. (Ed.). Biomechanics of distance running. (271-305). Champaign: Human Kinetics Books*
93. Williams, K.R., and Cavanagh, P.R (1987). Relationship between distance running mechanics, running economy and performance. *J. Appl. Physiol. 63(3): 1236-45*
94. Williams, T.J., and Krahenbuhl, G.S (1997). Menstrual cycle phase and running economy. *Med. Sci. Sports Exerc., 29(12): 1609-18*
95. Wright, S., and Weyand, P.G (2001). The application of ground force explains the energetic cost of running backward and forward. *J. Exp. Biol. 204: 1805-1815*
96. Xu, F., and Rhodes, E.C (1999). Oxygen uptake kinetics during Exercise. *Sports Medicine 27(5): 313-327*
97. Zamparo, P., Perini, R., Orizio, C., Sacher, M., and Ferretti, G (1992). The energy cost of walking or running on sand. *Eur. J. Appl. Physiol. 65: 183-187*