

Economía en la carrera de resistencia

LATORRE ROMÁN PEDRO ÁNGEL
 Doctorado del Departamento
 de Educación Física.
 Universidad de Granada
 Profesor de Educación Secundaria
 IES Sabiote

SOTO HERMOSO VÍCTOR MANUEL
 Profesor titular de la Facultad
 de Ciencias de la Actividad Física
 y el Deporte
 Universidad de Granada

CORRESPONDENCIA:
 C/ Forjadores, 13
 Úbeda (Jaén)
 23400

APUNTS. MEDICINA DE L'ESPORT. 2000; 134: 25-35

RESUMEN. Uno de los mayores indicadores de rendimiento en la carrera de resistencia es la economía energética, máxima expresión del aplazamiento de la fatiga. En la economía energética están implicados una serie de factores intrínsecos e extrínsecos al atleta destacando aspectos biomecánicos, fisiológicos, psicológicos, antropométricos, ambientales, materiales y de entrenamiento. Los datos obtenidos de los diversos estudios ofrecen resultados contradictorios en relación con: el tipo de entrenamiento y sexo; sin embargo otros resultados son más objetivos, así se conocen las características cinemáticas de un atleta económico, además están bien descritos aquellos factores externos que pueden afectar al ahorro energético. Los estudios fisiológicos han mostrado variación entre el consumo de energía corriendo a una determinada velocidad, pudiendo ser parte de esta variabilidad a diferencias en la mecánica de carrera. Muchos de estos estudios tienen limitaciones inherentes al método experimental empleado en relación con: el análisis 2D ó 3D, el uso de tapiz rondante, la velocidad específica de carrera, el tipo de población o las variables escogidas; todo ello supone problemas de generalización. Es necesario realizar más estudios teniendo en cuenta otros factores como: el estado de entrenamiento, la fatiga, la velocidad de carrera, fuerza y flexibilidad de los sujetos, sexo, estructura del cuerpo etc.

PALABRAS CLAVE: Coste energético, consumo de oxígeno, carga submáxima, ejercicio físico.

SUMMARY. One of the main performance indicators in the endurance race is the energetic economy, the maximum expression of fatigue postponement. In energetic economy, a series of intrinsic and extrinsic factors to the athlete are involved, of which biomechanical, physiological, psychological anthropometrical, environmental, material and training factors stand out.

The data obtained form various studies offer contradictory results in relation to the kind of training and the sex. However, other results are more objective, the cinematic characteristics of an economic athlete are known, and those external factors that can affect energy saving are thoroughly described.

Physiological studies show variation in energy consumption when running at a certain speed. Part of this variability could be due to the difference in the race's mechanics. Many of these studies have limitations inherent to the applied experimental method in relation to: 2D or 3D analysis, the use of treadmill, the race's specific speed, the kind of population, or the selected variables; all this involves generalization problems.

It is necessary to work on other studies taking into account other factors, such as training state, fatigue, speed power and flexibility of the subject, sex and body structure.

KEY WORDS: Energy cost, oxigen uptate, submaximal load, fisic exercise.

1. INTRODUCCION

El rendimiento deportivo está determinado por numerosos factores que además de los condicionamientos genéticos, se constituyen en aquellos componentes básicos del entrenamiento deportivo: preparación física, técnica, táctica, psicológica, entrenamiento invisible etc. Los estudios sobre el rendimiento físico-deportivo humano se han basado fundamentalmente en estas líneas de trabajo.

La práctica de la carrera de fondo está muy afianzada en la sociedad actual en relación con tres niveles básicos: aficionado, competitivo y de alto rendimiento. Su estudio es esencial para alcanzar los objetivos implicados en cada uno de los niveles anteriores, ya sea de entretenimiento- salud o rendimiento y éxito deportivo respectivamente.

El rendimiento en la carrera de resistencia está influenciado por numerosos factores y condicionantes que podemos dividir fundamentalmente en cuatro grandes bloques:

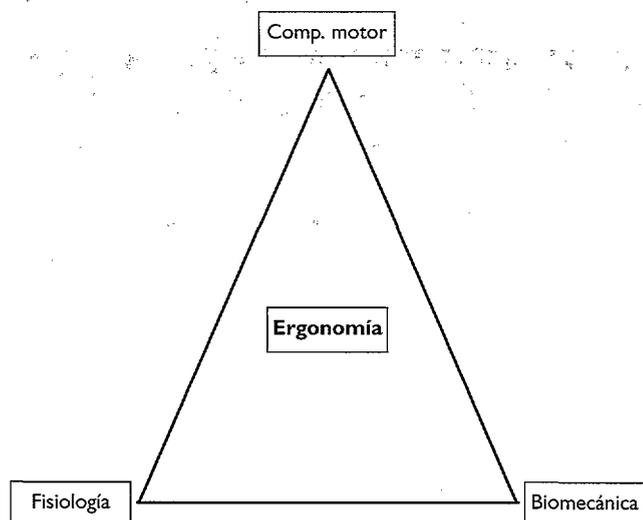
- Factores biomecánicos
- Factores tácticos
- Factores fisiológicos
- Factores psicológicos

En relación con los factores biomecánicos, García y cols (1996)¹, hacen referencia a las características mecánicas de la técnica de carrera en relación con angulaciones segmentarias y articulares, frecuencia y amplitud de movimientos, velocidad de carrera etc.; todo ello en íntima relación con la economía de movimientos. En este apartado también entrarían en consideración las diferencias por edad y sexo, tipo de material deportivo empleado, nivel de entrenamiento etc. Los factores tácticos hacen referencia a la adecuada dosificación del esfuerzo que permita al atleta obtener el máximo rendimiento. En relación con los factores fisiológicos, Navarro (1998)² considera aspectos condicionantes tales como: El aparato cardiocirculatorio, metabolismo energético, regulación hormonal y sistema muscular. Por último, se sugiere muchas veces que los factores psicológicos desempeñan un papel importante en la consecución de rendimientos extraordinarios en deportes de resistencia, estas consideraciones muchas veces son fruto de registros anecdóticos de deportistas, entrenadores etc.³ Sin embargo, parece ser que las demandas de rendimiento de cada especialidad deportiva requieren que el deportista funcione psicológicamente de una determinada manera para poder decidir y actuar con la mayor eficacia posible y tener éxito en la competición; así un corredor de fondo que controle sus pensamientos y sensaciones de fatiga será

capaz de reservar su esfuerzo en los momentos críticos de la carrera; por lo tanto, parece ser que el funcionamiento psicológico puede influir de manera positiva o negativa en el funcionamiento físico, técnico y táctico de los deportistas.⁴ Sin embargo, O'Connor (en Shephard y col, 1996)³, considera que hay escasez de pruebas científicas que documenten el impacto beneficioso de las intervenciones psicológicas sobre el rendimiento físico de los atletas. Lo que sí parece ser cierto es que los corredores de fondo poseen una tolerancia al dolor mayor que la población normal o el resto de población deportista.³

En suma, Gutiérrez (1998)⁵ considera que el análisis y estudio del movimiento deportivo se realiza básicamente a través de tres perspectivas: fisiológica, biomecánica y de comportamiento motor, concretadas y relacionadas en la figura 1. Así, desde un análisis multidisciplinar del estudio de la carrera de resistencia, tendríamos como núcleo básico la ergonomía, perspectiva que engloba la mayor parte de los parámetros relevantes en el gesto de la carrera.

Figura 1 Perspectivas básicas que estudian el movimiento humano (adaptado de Gutiérrez, 1998).⁵



2. FATIGA Y ECONOMIA DE LA CARRERA

Analizando los anteriores planteamientos podemos decir que la carrera de resistencia tiene como objetivo postergar al máximo la aparición de la fatiga, que en última instancia será la que altere todos aquellos factores físicos, psíquicos y técnicos que determinan la prestación deportiva. La fatiga produce alteraciones objetivas de los parámetros de ejecución de una actividad motora, así, Platonov citado por Gusi (1991)⁶,

considera que la fatiga es el principal factor de perturbación de la estabilidad de las acciones motrices, así incluso los deportistas de alto nivel son incapaces de mantener una estabilidad motriz.

Del análisis de la literatura especializada sobre trabajos que analizan las perspectivas anteriores, han sido varios los estudios que han intentado aclarar las relaciones entre la fatiga y las alteraciones mecánicas y técnicas de la carrera de resistencia;^{7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17} casi todos ellos se han centrado en relacionar la economía y mecánica de carrera. Las relaciones entre la mecánica y la economía de carrera parecen existir pero actualmente hay muchas incógnitas para aclarar la naturaleza exacta de esta relación. Willians (1990)⁷, describe que la mayor parte de los estudios fisiológicos han mostrado una amplia variación en el consumo de energía submáxima al correr a una velocidad dada, siendo parte de esta variabilidad debida a diferencias en la mecánica de carrera.

Donskoi y Zatsiorski, (1988)¹⁹ y Gusi (1991)⁶ manifiestan que durante la actividad muscular, la fatiga se manifiesta de dos maneras:

- a) *Fase de fatiga compensada o latente*, también denominada por Platonov (1991)²⁰ cansancio oculto; en la que a pesar de incrementarse las dificultades motrices, el deportista mantiene la intensidad de ejecución de la tarea, la velocidad de carrera se mantiene a costa de un menor ahorro energético, y en consecuencia una deficiente coordinación muscular con variaciones en la técnica de los movimientos.
- b) *Fatiga descompensada o evidente* en la que el deportista no puede mantener los niveles de intensidad de trabajo requeridos para la actividad motora.

Los cambios originados por la fatiga requieren la utilización de nuevos estereotipos motores adaptados a los recursos disponibles por el organismo en cada momento.⁶ Siler y Martin (1991),¹⁰ describieron que los corredores realizaban compensaciones de los modelos de carrera cuando estos se acercaban a la fatiga, siendo algunos individuos más susceptibles a la fatiga que otros, como reflejan las compensaciones extremas de los modelos de carrera.

Donskoi y Zatsiorski, (1988)¹⁹, manifiestan que desde un punto de vista biomecánico existen dos maneras de mejorar la economía de carrera y así reducir la fatiga:

- Disminuyendo las magnitudes de gasto energético en cada ciclo de movimiento
- Recuperando la energía, es decir, transformando la energía cinética en potencial y viceversa.

En lo que se refiere a la primera manera de mejorar la economía de carrera, existen diversas formas de expresarla, así se podría aumentar la economía eliminando los movimientos superfluos (eliminado la oscilación vertical exagerada del CG), eliminado las contracciones musculares innecesarias, así en los deportistas de alto nivel el tiempo total de participación muscular es menor, por tanto el tiempo de relajación es mayor; disminuyendo las resistencias externas; disminuyendo las oscilaciones de velocidad dentro de cada ciclo de movimiento, así el aumento de velocidad después de su disminución exige gasto energético y por último, eligiendo la óptima relación entre frecuencia y amplitud de zancada. En relación con la segunda alternativa, la energía cinética del movimiento en la carrera se transforma en energía potencial de deformación elástica de la musculatura que posteriormente será reutilizada en energía cinética para desplazar el CG lo que podría suponer una recuperación o "reciclaje" de energía.¹⁹ Además, Gusi (1991)⁶ considera que una de las principales formas de economizar energía se basa en la automatización de las acciones motrices, al liberar parcialmente al sistema nervioso.

La precisión con que el hombre logra ajustar sus movimientos para minimizar el gasto metabólico asociado a la velocidad de desplazamiento es aún poco conocida; así que, por la imposibilidad de relacionar los parámetros biomecánicos registrados con el gasto metabólico, las aportaciones de la biomecánica han quedado restringidas a campos de más fácil acceso como: el diseño de calzado deportivo, suelos sintéticos, descripción de técnicas de carrera (aún con importantes limitaciones interpretativas)²¹ etc.

3. FACTORES DETERMINANTES DE LA ECONOMIA DE CARRERA

La relación entre mecánica y economía de carrera está influenciada por numerosos factores entre los cuales destacamos: la masa corporal y su distribución, la velocidad de movimiento, la longitud y frecuencia del paso, la flexibilidad muscular, la edad, el sexo, la habilidad, las variables anatómicas, el nivel de entrenamiento, el tipo de contracción muscular etc.^{22, 1, 19, 23, 24} Gran cantidad de estos factores los resumimos en la tabla 1.

Todos estos factores se relacionan íntimamente con el principal elemento perturbador de la cinemática de la carrera como es la fatiga que va a producir variaciones del patrón de movimiento y de la estabilidad técnica a lo largo del transcurso de las acciones motrices.^{6, 19, 21} La economía de carrera podría suponer un elemento de adaptación al entrenamiento y

Tabla 1 Interacciones del entrenamiento sobre la economía de carrera (Vuorimaa, 1991).³⁹

Características del entrenamiento	ACCION
Gran volumen de kilómetros	NEGATIVO
Entrenamiento puntual de elevada intensidad	NEGATIVO
Entrenamiento de fuerza máxima	NEGATIVO
Técnica de carrera	POSITIVO
Entrenamiento de fuerza de cargas medias	POSITIVO
Entrenamiento de elasticidad	POSITIVO
Acondicionamiento muscular	POSITIVO

elemento de aplazamiento de la fatiga. En este sentido, Michailov citado por Ballesteros (1990)²⁵, considera que la característica fundamental de la técnica en carreras de resistencia es la economía funcional, es decir, la habilidad de correr una distancia con un gasto de energía mínimo. No está claro si resulta conveniente o no la variación de la técnica de los movimientos cuando aparece la fatiga, ya que en suma, las alteraciones de los movimientos pueden ser provocados por la fatiga o como repuesta de adaptación; por tanto, la elevación de la estabilidad de la técnica de carrera en relación con la fatiga, es una de las tareas más importantes de los deportes y se puede lograr mediante un entrenamiento prolongado, incluso en situaciones de agotamiento.¹⁹ Analizando algunos de los anteriores factores determinantes de la economía de carrera descritos en la tabla 1, podemos descubrir las características más importantes de ésta.

En relación con la capacidad de relajación del deportista y su influencia en la economía de carrera, una intervención psico-fisiológica, mediante entrenamiento en relajación y biofeedback puede disminuir el consumo de oxígeno máximo en una carrera en tapiz rodante al 70% del VO₂ máx., así lo demostraron Caird y cols (1999)²⁶, obteniendo disminuciones en un 7.3%, 2.5% y 9.2% de la frecuencia cardiaca, de la ventilación y la concentración de lactato respectivamente.

Teniendo en cuenta los aspectos antropométricos, Anderson (1996)²⁴ considera que una variabilidad de dimensiones antropométricas podría influir en la efectividad biomecánica, estos incluyen: altura, menor porcentaje de grasa, pelvis estrecha, pies pequeños y una morfología de la pierna que distribuya más masa cerca de la cadera.

En relación con la edad, los niños pese a su enorme potencial aeróbico poseen una menor economía gestual como consecuencia de una menor eficiencia mecánica, por lo que presentan un mayor costo metabólico durante el esfuerzo,²⁷ a

esto se unen ciertos problemas en la termorregulación sobre todo en ambientes extremos.²⁸ Kraenbuhl y Williams (1992)²⁹ comprobaran que los niños eran menos económicos que los adultos así presentaban un equivalente ventilatorio de oxígeno mayor y unas proporciones de zancada más desventajosas, mejorando la economía de carrera con la edad incluso en ausencia de entrenamiento.

En relación con el sexo, tanto Bhambhani y Singh (1985)³⁰ como Morgan y cols (1989),³¹ consideran que los costes metabólicos netos a velocidades submáximas son mayores en mujeres que en hombres. A su vez Hegerud citado por García y cols (1996)¹ describe que a velocidades submáximas las diferencias en la economía de carrera intersexos no son importantes pero a velocidades altas, los hombres se expresan netamente más económicos. Thomas y cols (1999)³² sometieron a 21 hombres y a 19 mujeres a una prueba de 5 Km. en tapiz rodante a una intensidad del 80-85% del VO₂ máx., se tomaron medias de lactato, frecuencia cardiaca, temperatura corporal, ventilación y VO₂ máx. a los 5 minutos de la prueba y en el último minuto de ésta; todos los parámetros fisiológicos anteriores aumentaron significativamente siendo estos cambios similares en ambos sexos. En otro estudio, Atwater (1990)³³ comprobaron que los parámetros cinemáticos de la zancada y las proporciones de ésta (tiempo de apoyo y vuelo) diferían entre hombres y mujeres cuando se expresan en porcentajes absolutos; así, generalmente los hombres debido a su mayor estatura tienen longitudes de zancadas mayores y proporciones de paso menores al correr a una velocidad dada, pero cuando estas comparaciones se realizan en relación a las características estructurales, no aparecen evidencias que demuestren variaciones de la cinemática de carrera por el sexo. Williams (1990)⁷, afirma que existen diferencias evidentes entre hombres y mujeres en cuanto al VO₂ máx. y que los factores biomecánicos pueden influir, pero no existe aún información amplia para apoyar esta hipótesis; así lo confirman Morgan y cols (1989)³¹, los cuales consideran que aunque existen datos de ciertos estudios que ofrecen ventajas en economía de carrera en los varones, la mayoría de las evidencias no apoyan la diferencia del género en ésta.

El tipo de entrenamiento también parece afectar a la economía de carrera aunque la bibliografía aporta resultados contradictorios, así Costill y Fox (1969)³⁴ y Lake y Cavanagh (1996)³⁵, afirman que la economía de carrera no se modifica con el entrenamiento, sin embargo Conley y cols (1981)³⁶, Legros y cols (1992)³⁷ y Rodas y cols (1989)³⁸, manifiestan claras diferencias. En un estudio realizado sobre parejas de

gemelos deportistas, Rodas y cols (1989)³⁸ encontraron que una vez pasados seis meses de entrenamiento se habían encontrado diferencias en la economía de carrera. Conley y cols (1981)³⁶ encontraron mejoras en la economía de carrera y del poder aeróbico durante un entrenamiento atlético de 18 semanas basado en entrenamientos interválicos, así se mejoró la economía de carrera a una velocidad dada de un 83.5% a un 71.5 % del VO₂ máx. Además, Vuorimaa (1991)³⁹ considera que la economía de carrera va a depender del tipo de entrenamiento llevado a cabo. Este autor expresa en la tabla I las interacciones de diferentes tipos de entrenamiento sobre la economía de carrera. Por último, Messier y Cirillo (1989)⁴⁰, pudieron comprobar que entrenando a mujeres corredoras principiantes con retroinformación visual y verbal, podían modificar su ineficaz estilo de carrera, aunque el eslabón entre las modificaciones del estilo de carrera y las mejoras en economía y el ejercicio percibido era incierto.

Teniendo en cuenta el tipo de cualidad física predominante, Donskoi y Zatsiorski, (1988)¹⁹, consideran que en los deportes cíclicos con gran predominio de las cualidades motoras, el resultado deportivo no es fiel indicador de la efectividad técnica, en este sentido, los indicadores de economía o eficiencia no pueden analizarse como indicadores de maestría técnica, son otros indicadores complejos que dependen tanto de la eficacia técnica como de las posibilidades funcionales de los deportistas; así, en las carreras de distancias largas, los deportistas de diferente nivel pueden tener iguales posibilidades funcionales. En este sentido, Conley y cols (1981)³⁶ estudiaron un grupo de 12 corredores de 10.000 m con marcas entre 30 y 33 minutos, encontrando que un corredor con uno de los más pobres consumos de oxígeno tenía uno de las mejores marcas; por lo que el VO₂ máx. no puede ser considerado como único elemento de discusión del resultado del rendimiento deportivo. En este sentido, en la tabla II, Donskoi y Zatsiorski (1988)¹⁹ expresan las posibilidades funcionales e indicadores biomecánicos de deportistas con una técnica de carrera efectiva y no efectiva en una distancia de 5.000 m.

Por otro lado, los costes metabólicos de energía son influenciados notablemente en poder mecánico por eventos que involucran el ciclo acortamiento-estiramiento de los músculos de la extremidad inferior durante la carrera.^{41, 42, 43} así todas aquellas acciones musculares en las que intervengan el ciclo estiramiento-acortamiento y por lo tanto los componentes elásticos de la musculatura, manifiestan economía metabólica.^{1, 19, 25, 45, 23} Sin embargo, Van-Ingen y cols (1997)⁴⁶ consideran que la energía elástica no puede afectar a la eficacia mecánica ya que esta energía no se relaciona con la conversión de energía metabólica en mecánica, por lo que aún no hay evidencia para afirmar o desmentir el refuerzo en la eficacia del músculo que tiene el ciclo estiramiento-acortamiento. Lo que sí parece ser es que exista una variabilidad considerable entre los individuos que posean una habilidad notable para utilizar la energía elástica, lo cual explicaría las diferencias de costes metabólicos de los individuos corriendo a una velocidad dada.^{41, 7} Por otro lado, Voget y cols citados por Van Gheluwe y Madsen (1997)¹⁷, sugirieron que la fatiga del corredor puede llegar a modificar la fase de aterrizaje debido a los cambios de preactivación de la musculatura, con lo que se modificarían muchos parámetros cinemáticos; además la transferencia de energía excéntrica y concéntrica se vería drásticamente disminuida durante la fatiga muscular.

En relación con la oscilación vertical del CG (centro de gravedad), la mayor parte de los investigadores coinciden en afirmar que se produce un movimiento sinusoidal de éste tanto en el plano sagital como en el plano frontal. Osterhoudt, citado por Sánchez y cols (1996)⁴⁷, considera que el incremento de la velocidad se traduce en una disminución de la altura del CG entre el momento del contacto y el despegue. En otro sentido, la excesiva oscilación del CG se relaciona adversamente con el VO₂ máx., así dentro de un grupo de sujetos corriendo a la misma velocidad, existe un alto grado de variabilidad en relación con la oscilación vertical del CG, parece ser sin embargo que para muchos individuos es posible correr económicamente a pesar de realizar una oscilación relativamente alta del CG; así la ineficacia de una gran osci-

Tabla II Parámetros funcionales y biomecánicos implicados en la efectividad técnica (Modificado de Donskoi y Zatsiorski, 1988).¹⁹

Efectividad técnica	Marca	Índice de masa corporal	VO ₂ en ml/kg m	Amplitud de Zancada	Número de pasos	Elevación del CG	Trabajo para la elevación del CG en kgm
Mala	16'30"	20.13	67.9	1.60	3125	10	17968
Buena	14'52"	19.56	68.4	1.77	2825	6	9407

lación del CG podría ser compensada a través de otros aspectos cinemáticos eficaces. Además la oscilación vertical del CG, puede variar dependiendo de la pierna de apoyo.²¹

En relación con los parámetros de la zancada, se produce un incremento lineal relativamente amplio de la longitud de zancada cuando las velocidades son bajas (3.5 a 6.5 m/s), aumentando la frecuencia de zancada de forma curvilínea a medida que se incrementa la velocidad.⁴⁷ La disminución del tiempo de zancada se debe principalmente a un menor tiempo de apoyo, en este sentido, Kurakin, citado por Sánchez y cols (1996)⁴⁷, consideran que los mejores corredores de fondo utilizan menos tiempo de apoyo y un tiempo de vuelo ligeramente mayor que los peores corredores. Así Sánchez y cols (1996)⁴⁷, consideran que un tema importante de investigación supondría averiguar la relación de tiempos entre varias fases de apoyo en función de diferentes velocidades de carrera. Además, existe una relación entre la longitud de zancada y el gasto energético, así éste último aumenta con el incremento de la zancada.¹ Cavanagh y Williams (1982)⁴⁸ demostraron que la longitud de la zancada en 10 sujetos entrenados era económica cuando se elegía libremente. Kaneko y cols (1987)⁴⁴, encontraron que el consumo de energía era moderado cuando se corría a frecuencias de zancada diferentes mientras se mantenía constante tres tipos de velocidad planteada 2.5, 3.5 y 4.5 metros/segundo; sin embargo se ahorró energía para los tres tipos de velocidades a la misma longitud de paso. Hogberg citado por Williams (1990)⁷, encontró que aumentos y disminuciones de la longitud de la zancada producían un coste energético aumentado. Este mismo autor y Knuttgen citado por Williams (1990)⁷, encontraron además que a varias velocidades, un paso más largo producía costos energéticos mayores que uno más corto, todos ellos diferentes al libremente escogido. Williams y Cavanagh (1986)⁸, encontraron una correlación de 0.47 entre la longitud de la zancada y el VO₂ máx., pero parece ser que esta correlación estaba más relacionada con el tamaño del cuerpo, así en posteriores estudios, Williams y Cavanagh (1987)⁹, encontraron una correlación más baja entre estos dos parámetros. En suma, parece ser que exista una longitud de zancada óptima y económica para cada velocidad de desplazamiento y para cada corredor, así para una velocidad dada, cualquier variación de la zancada óptima repercute negativamente en el coste metabólico. Además, Williams y Cavanagh (1986)⁸, en un estudio con atletas varones, contrastaron que el consumo de oxígeno era menor cuando: mayor era el tiempo de apoyo, mayor era el ángulo del muslo con la vertical durante la extensión de la cadera, menor era la extensión

de la rodilla y por último, a una velocidad de flexión plantar mayor. En otro estudio con mujeres corredoras de elite, Williams y cols (1987)⁴⁹ encontraron que la mejor economía estaba asociada con una menor extensión del muslo y con una velocidad de extensión más lenta, menor velocidad de flexión de la rodilla durante el balanceo y por último con una dorsiflexión mayor y velocidad de ésta mayor durante el apoyo. Por tanto, con la fatiga, los mecanismos articulares sufren una variación, la variación de las amplitudes articulares implica alteraciones en los recorridos articulares y en los ángulos de eficacia de cada movimiento, mermándose a la vez las posibilidades de utilización del componente elástico.⁶ Al alterarse los patrones de movimiento, por lo general, para mantener la velocidad de desplazamiento se debe alargar la zancada,²¹ sin embargo, cuesta menos energía acortar la zancada y aumentar la frecuencia de ésta para mantener una velocidad constante de carrera.⁵⁰

En relación con la intensidad de la carrera Feng-Dunshou (1994)⁵¹ estudió la técnica de carrera de Wang Junxia cuando batió el récord mundial de 10.000 m femeninos, realizando una asombrosa marca de 29'31"78. Los resultados de su estudio indicaron que esta atleta mantenía una velocidad media de 5,5 m/s durante los primeros 7 km., y que posteriormente fue incrementando hasta los 6.28 m/s. Su longitud de zancada a lo largo de los primeros 7 Km. fue de 1.52 m y aumentó hasta 1.72 m al final de la prueba, siendo la frecuencia de zancada bastante estable a lo largo de toda la competición, alrededor de 3.7 pasos por segundo. La oscilación del CG era aproximadamente de 7 cm. En suma, a partir de los 7 Km., esta atleta mejoró la amplitud de sus movimientos y por lo tanto la velocidad de carrera creando nuevas condiciones técnicas para una aceleración eficaz. Price (1994)⁵² analizó en nueve corredores la relación entre parámetros biomecánicos (frecuencia y longitud de zancada, tiempo de zancada y % de apoyo) y fisiológicos (VO₂, frecuencia cardíaca y lactatemia), a lo largo de dos carreras en tapiz rodante, una a un ritmo cómodo y otra a un ritmo de competición; los resultados indicaron que la longitud y frecuencia de zancada aumentaron al tiempo que se incrementó la intensidad requerida; el tanto por ciento de apoyo y el tiempo de zancada disminuyó al aumentar la intensidad de la carrera, por último, a medida que aumentó la intensidad hubo un incremento evidente de las variables fisiológicas analizadas, y la eficacia disminuyó con un aumento de la zancada. Williams y Cavanagh (1987)⁹ concretan en la tabla III las consecuencias mecánicas en más importantes relacionadas con la intensidad de la carrera.

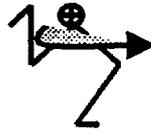
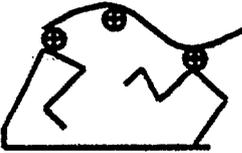
En relación con los movimientos de la parte trasera del pie, Van Gheluwe y Madsenw (1997)¹⁷, encontraron que el agotamiento no influía sustancialmente en el varo tibial excepto en el apoyo inicial del pie en el suelo; sin embargo la eversión y la pronación subtalar del pie aumentó, no influyendo el aumento de la zancada en estos parámetros. También, Hamill y Bates (1988)¹² encontraron aumentos de la eversión del pie en una carrera al 90% del VO_2 máx.

Por otro lado, los brazos proporcionan impulso y ayudan al corredor a mantener una velocidad horizontal más cons-

tante, jugando además un papel importante en el equilibrio de la velocidad angular adquirida.⁷ Hinrichs y col (1987)³³ observaron que no existía ventaja mecánica evidente en el clásico estilo de balanceo de los brazos directamente delante y detrás, frente al estilo que la mayor parte de los corredores de fondo adoptan, al permitir el cruce de los brazos ligeramente delante del cuerpo.

Existen además otro tipo de factores externos que pueden afectar a la cinemática y economía de carrera, nos estamos refiriendo a la resistencia aerodinámica, la fricción, el tipo de

Tabla III Interacción de parámetros biomecánicos con la economía energética (adaptado de Williams y Cavanagh, 1987)

PARÁMETROS	INTENSIDAD DE CARRERA			GRÁFICO
	VO_2 ↓	VO_2 ↑	VO_2 ↑↑	
Ángulo de la tibia con la perpendicular a la articulación de la rodilla	8.2°	8.3°	5.5°	
Inclinación del tronco en relación con la perpendicular al suelo	5.9°	3.3°	2.4°	
Flexión máxima de la rodilla en la fase de sostén	43.1°	41.9°	39.4°	
Flexión plantar del pie	73.8°	68.3°	67.4°	
Velocidad de recuperación de la pierna que finaliza la impulsión	99.4	106.7	116.3	
Variación vertical del centro de gravedad	9.1 cm	9.3 cm	9.6 cm	

superficie, al tipo de calzado etc. Bonen y cols citados por Williams (1990)⁷, no encontraron diferencias en el VO_2 máx. en carrera sobre tapiz rodante, en superficie de cemento, de carbonilla o tartán. Por otro lado, Davies citado por Mcardle y cols (1990)⁵⁰, consideraba que la carrera en contra del viento podría suponer un aumento del coste energético proporcional a la velocidad del viento al cuadrado. Si un corredor corre inmediatamente detrás de otro, el área de resistencia aerodinámica disminuiría un 80% reduciéndose a la vez en un 6% el coste energético (Pugh, citado por Williams, 1990)⁷. En relación con el tipo de calzado, Rodano (1990)⁵⁴ considera que en las competiciones de fondo, el 75% de los atletas tienen una modalidad de apoyo según la cual impactan en el suelo apoyando con el talón y el 25% restante lo realizan con el mesopié; este dato ha llevado a los fabricantes a cuidar los materiales dispuestos en la parte posterior del calzado; además según este mismo autor, durante toda la impulsión, el retropié realiza a través de sus movimientos en el plano frontal, una función esencial en el control del apoyo, así se ha demostrado que amplitudes demasiado elevadas de estos movimientos son la causa de problemas en el tendón de Aquiles y de la rodilla; dado que estos movimientos dependen de las características físicas de los atletas, se han introducido almohadillas y refuerzos aptos para limitar el estrés secundario de la prono supinación. Además Morgan y cols (1996)⁵⁵ consideran que llevando calzado atlético elástico y de fina suela se puede reducir el VO_2 posiblemente debido a un almacenamiento de energía elástica en el tendón de Aquiles y en el arco longitudinal del pie. En este sentido, Ramiro y cols (1992)⁵⁶ consideran que no sólo el peso condiciona un mayor consumo de oxígeno en la carrera, otros aspectos como la capacidad de protección frente a impactos o el control de movimientos están directa o indirectamente relacionados con el rendimiento en la locomoción; sin embargo todavía muchos fabricantes sacrifican los elementos del control de los movimientos a favor de una disminución del peso de las zapatillas. En un estudio realizado por estos autores sobre la influencia del peso, las características de amortiguación y el control de movimiento de diversos modelos de zapatillas en el VO_2 máx., establecieron como conclusiones la existencia más consistente de una relación entre el menor peso y menor VO_2 máx., no así con los otros dos parámetros analizados; sin embargo, este estudio presentaba bastantes restricciones relacionadas con la velocidad individual de cada atleta y la superficie de carrera. Parece ser que los calzados más ligeros pueden suponer un ahorro de un 1,3% en el consumo de oxígeno y que en una carrera de 10.000 mts podría suponer

un ahorro de 0.6 ml/kg.⁵⁶ En relación con el peso añadido, Frederick (1985)⁵⁷ considera que cada 100 g de peso agregado al calzado de cada pie puede aumentar las demandas aeróbicas aproximadamente en un 1%. Martín citado por Williams (1990)⁷ comprobó aumentos de 3.5% y 7.2% del VO_2 máx. por cada 0.5 kg de peso añadidos a cada muslo y cada pie respectivamente, así como aumentos del trabajo mecánico y variaciones de ciertos parámetros del segmento sobrecargado. Por último, Cureton y Sparling citados por Williams (1990)⁷ comprobaron aumentos de 0.16 L.min⁻¹ del consumo de oxígeno cuando se añadían pesos al tronco alrededor del 7.5% del peso corporal.

La economía de carrera es por tanto uno de los factores más importantes en el rendimiento de los corredores de fondo y es posible que cambios en la economía de carrera a una determinada velocidad lleven asociados cambios en el rendimiento. Los estudios fisiológicos han mostrado una amplia variación entre el consumo de energía submaxima corriendo a una determinada velocidad, pudiendo ser parte de esta variabilidad a diferencias en la mecánica de carrera. Muchos de estos estudios tienen limitaciones inherentes al método experimental empleado, todo ello relacionado con: el uso de análisis 2D o 3D, el uso del tapiz rodante frente a la carrera en suelo, la influencia de la velocidad específica de carrera, el tipo de población o el juego de variables escogidas; todo ello supone problemas para la generalización. Es necesario realizar más estudios al respecto, teniendo en cuenta además otros factores importantes como: el estado de entrenamiento, la fatiga, la velocidad de carrera, fuerza y flexibilidad de los sujetos, estructura del cuerpo etc.

La economía de carrera siempre se ha valorado a través de medidas fisiológicas en laboratorio siendo el parámetro más empleado y ajustado a este concepto el VO_2 máx. En estudios de campo, por la dificultad de la monitorización dinámica y por las posibles influencias en los parámetros cinemáticos de un peso añadido para poder valorar el VO_2 máx., se han empleado otras variables fisiológicas como la frecuencia cardíaca, la temperatura corporal y la percepción subjetiva del esfuerzo.

El VO_2 máx. tiene una relación lineal con la frecuencia cardíaca; al aumentar ésta aumentará el VO_2 máx. En un entrenamiento interválico, con las sucesivas repeticiones y por el efecto acumulado de la fatiga, aumenta la frecuencia cardíaca y por lo tanto el VO_2 máx. La frecuencia cardíaca evoluciona de forma lineal en relación con la intensidad del ejercicio, mientras la energía aportada sea principalmente del sistema aeróbico.⁵⁸ Así podemos extrapolar los valores de VO_2

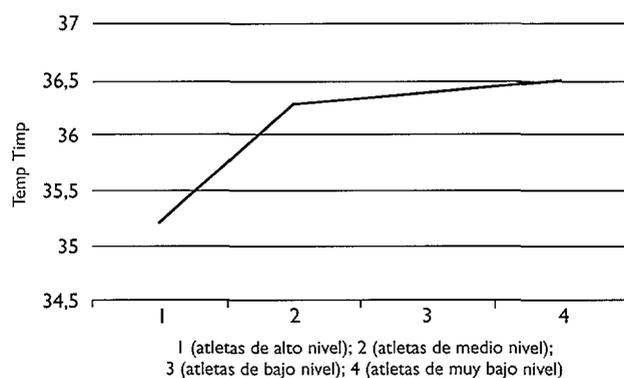
de cada intensidad de ejercicio con su correspondiente frecuencia cardíaca.^{1, 50, 59} Esta relación, sin ser exacta, nos permite aproximar con cierta fiabilidad la intensidad de la carga;¹ siempre teniendo en cuenta, como afirman Mcardle y cols, (1990)⁵⁰ y Astrand y Rodahl (1985)⁵⁹ que en un sujeto con una baja eficiencia mecánica, se predice que el consumo de oxígeno es menor ya que el transporte adicional de oxígeno influye en la frecuencia cardíaca.

Por otro lado, la eficiencia mecánica del cuerpo humano es alrededor de un 25%, por lo que aproximadamente un 75% se disipa en forma de calor, cuanto mayor es la intensidad de trabajo, mayor es la cantidad total de calor producida. La diferencia entre la producción de energía y la producción de calor es una expresión de la eficiencia mecánica y la diferencia entre la producción de calor y la pérdida total de éste es una consecuencia de la elevación de la temperatura.⁵⁹ A velocidades submáximas la temperatura corporal se manifiesta de manera lineal con respecto al consumo de oxígeno. Por lo tanto, al mismo porcentaje de VO_2 máx., una persona con una buena condición física general, genera más energía en el ejercicio y sin embargo tiene la misma temperatura corporal que otro sujeto de menor condición física, por lo tanto la persona entrenada realiza el mismo ejercicio con menor temperatura corporal.^{59, 50} Pujol (1991)⁶¹ realizó medidas de temperatura timpánica sobre varios maratonianos de diferente nivel atlético al finalizar la Maratón de Jerez, los resultados de este estudio indicaron que los maratonianos que realizaban mejor marca elevaban menos su temperatura timpánica, hecho éste debido fundamentalmente a que los corredores más rápidos suelen ser más ligeros de peso y sufren menos la irradiación solar. En todo caso, en este estudio hubiese sido interesante comparar los modelos técnicos de carrera en corredores de semejante peso corporal y en situaciones semejantes de irradiación solar. En la figura 2 se expresan los resultados de este estudio.

En relación con la percepción subjetiva del esfuerzo, Alvarez (1994)⁶⁰ afirma que los indicadores de percepción subjetiva del esfuerzo son válidos para determinar la intensidad del esfuerzo por encima del umbral anaeróbico. La escala de percepción subjetiva del esfuerzo de Borg citado por Córdova (1998)⁶² está establecida entre 6 a 20 puntos; según varios autores es posible predecir la frecuencia cardíaca del esfuerzo al multiplicar cada valor por 10, incluso se han llegado a obtener correlaciones entre 0.80 y 0.90.⁶²

Figura II

Temperatura Timpánica de diferentes maratonianos en la maratón de Jerez (modificado de Pujol, 1991)⁶¹



4. CONCLUSIONES

Uno de los mayores indicadores de rendimiento en la carrera de resistencia es la economía energética como máxima expresión del aplazamiento de la fatiga, que en última instancia será la que altere todos aquellos factores físicos, psíquicos y técnicos que determinan el rendimiento deportivo. En la economía energética están implicados una serie de factores intrínsecos e extrínsecos al atleta destacando aspectos biomecánicos, fisiológicos, psicológicos, antropométricos, ambientales, materiales y de entrenamiento. Los datos obtenidos de los diversos estudios ofrecen resultados contradictorios en relación con: el tipo de entrenamiento y sexo; sin embargo otros resultados son más objetivos, así se conocen las características cinemáticas de un atleta económico, además están bien descritos aquellos factores externos (ambientales, materiales) que pueden afectar al ahorro energético. Por tanto, es posible que cambios en la economía de carrera a una determinada velocidad lleven asociados cambios en el rendimiento. Sería interesante para futuras investigaciones analizar otros parámetros (el estado de entrenamiento, la fatiga, la velocidad de carrera, fuerza y flexibilidad de los sujetos, estructura del cuerpo etc.) que afectan a la economía de carrera en atletas de fondo a velocidades competitivas y en situaciones reales de entrenamiento; para así comprobar si aquellos corredores que presentan un VO_2 máx. muy alto pero una economía del funcionamiento pobre, pueden ser más eficaces mejorando su técnica de carrera.

Bibliografía

1. GARCÍA, J., NAVARRO, M., RUIZ, J. Bases teóricas del entrenamiento deportivo. Madrid: Gymnos. 1996; 313-322.
2. NAVARRO, F. La resistencia. Madrid: Ed Gymnos. 1998; 43-48.
3. O'CONNOR, J. Aspectos psicológicos del rendimiento de resistencia. En Shepard, R y Astrand, P. La resistencia en el deporte. Barcelona: Paidotribo. 1996; 149-159.
4. BUCETA, J. Psicología del entrenamiento deportivo. Madrid: Dykinson. 1988; 17-18.
5. GUTIÉRREZ, M. Biomecánica deportiva. Madrid. Síntesis. 1998; 15-16.
6. GUSI, N. Efectos biomecánicos de la fatiga. *Apunts Educación Física y Deporte* 1991; 26: 43-50.
7. WILLIAMS, K. R. Relationships between distance running biomechanics and running economy. En, Cavanagh, P.R: Biomechanics of distance running. Champaign: Human Kinetics. 1990; 271-301.
8. WILLIAMS, K.R & CAVANAGH, P. R. Biomechanical correlates with running economy in elite distance. Proceedings of the North American Congress on Biomechanics, combined with. Organizing Committee. 1986; 2: 287-288.
9. WILLIAMS, K.R & CAVANAGH, P. R. Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *Journal-of-applied-physiology* 1987; 63(3): 1236-1245.
10. SILER, W & MARTIN, P. Changes in running pattern during a treadmill run to volitional exhaustion: Fast versus slow runners. *International Journal of Sports Biomechanics* 1991; 1: 12-28.
11. ELLIOT, B & ACKLAND, T. Biomechanical effects of fatigue on 10.000 meter running. *Research Quarterly for Exercise and Sports* 1981; 2: 160-166.
12. HAMILL Y BATES Y BATES, J & BATES, B.T. A kinetic evaluation of the effects of in vivo loading on running shoes. *Journal-of-orthopaedic-and-sports-physical-therapy* 1988; 10(2): 47-53.
13. MILGROM, C & COLS. Prevention of overuse injuries of the foot improved shoe shock attenuation: A randomized prospective study. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 1992; 281: 189-192.
14. CLARKE, T Y COLS. The effect of varied stride rate upon shank deceleration in running. *Journal of Sports Science* 1985; 3: 41-49.
15. NICOL, C., KOMI, P.V., MARCONNET, P. Effects of marathon fatigue on running kinematics and economy. *Scandinavian-journal-of-medicine-&-science-in-sport* 1991; 1(4): 195-204.
16. SPRAGUE, P & MANN, R. V. Effects of muscular fatigue on the kinetics of sprint running. *Research-quarterly-for-exercise-&-sport* 1983; 54(1): 60-66.
17. ARAKELYAN, E., PRIMAKOV, Y.N., TYUPA, V., UMAROV, A., GUSEYNOV, A. Biomechanical specific of fatigue in 400 meters running. *Teorija-i-praktika-fiziceskoj-kul'tury*. 1997; 7: 42-44.
18. VAN GHELUWE, B & MADSEN, C. Frontal Reafort Kinematics in Running Prior to Volitional Exhaustion. *Journal of Applied Biomechanics* 1997; 13: 66-75.
19. DONSKOI, D Y ZATSIORSKI, V. Biomecánica de los ejercicios físicos. Moscú: Raduga. 1988; 57-294.
20. PLATONOV, V. La adaptación al deporte. Barcelona: Paidotribo. 1991; 157-167.
21. VERA, P Y HOYOS, J. Biomecánica de la carrera de fondo. En Plara, F, Terrados, N., Vera, P. El maratón. Aspectos técnicos y científicos. Madrid. Alianza Deporte. 1994; 101-141.
22. MARTIN, P. E & MORGAN, D.W. Biomechanical considerations for economical walking and running. *Medicine-and-science-in-sports-and-exercise* 1992; 24(4):467-474.
23. FREDERICK, E. Limitaciones mecánicas al rendimiento humano. En Shepard, R y Astrand, P. La resistencia en el deporte. Barcelona: Paidotribo. 1996; 173-180.
24. ANDERSON, T. Biomechanics and running economy. *Sports-medicine* 1996; 22(2): 76-89.
25. BALLESTEROS, J. Carreras de medio fondo y fondo. En Bravo y cols. Atletismo: carreras y marcha. Madrid: Comité olímpico español, 1990; 79-166.
26. CAIRD, J., MCKENZIE, D., SLEIVERT, G. Biofeedback and relaxation techniques improve running economy in subelite long distance runners. *Medicine-and-science-in-sports-and-exercise* 1999; 31(5): 717-722.
27. GUTIERREZ, A. Características fisiológicas del niño ante el ejercicio: repuestas y adaptaciones. En Mora. Teoría del entrenamiento y acondicionamiento físico. Cádiz: COPEF. 1995; 256-257
28. DELGADO, M. Fundamentación anatómica y funcional del rendimiento y del entrenamiento de la resistencia del niño y del adolescente. *Motricidad* 1995; 1: 97-110.
29. KRAENBUHL, G & WILLIAMS, T. Running economy: changes with age during childhood and adolescence. *Medicine-and-science-in-sports-and-exercise* 1992; 24(4): 462-466.
30. BHAMBHANI, Y & SINGH, M. Metabolic and cinematographic analysis of walking and running in men and women. *Medicine-and-science-in-sports-and-exercise* 1985; 17(1): 131-137.
31. MORGAN, D.W., MARTIN, P.E., KRAHENBUHL, G. . . Factors affecting running economy. *Sports-medicine* 1989; 7(5):310-330.
32. THOMAS, D. Q., FERNHALL, B., GRANAT, H. Changes in running economy during a 5-km run in trained men and women runners. *Journal-of-strength-and-conditioning-research* 1999; 13(2): 162-167.

33. ATWATER, A. Gender Differences in Distance Running. En Cavanagh, P.R. Biomechanics of distance running. Champaign: Human Kinetics, 1990; 321-354.
34. COSTILL, D & FOX, E. Energetic of marathon running. *Medicine Science Sports* 1969; 1: 81-86.
35. LAKE, M. J & CAVANAGH, P. R. Six weeks of training does not change running mechanics or improve running economy. *Medicine-and-science-in-sports-and-exercise* 1996; 28(7): 860-869.
36. CONLEY, D., KRAHEMBHL, G., BURKETT, L. Changes in running economy relative to VO₂ máx. During a cross-country season. *Journal Sport Medicine Fitness* 1981; 24: 21-326.
37. LEGROS, P., BRSWALTER, J., JOUSSELIN, E. Variation du cout énergétique de la course en fonction de L'entraînement: évolution sur 7 annes pour un coureur de longues distances. *Science & Sport* 1992; 7: 35-36.
38. RODAS, G., ESTRUCH, A., PONS, V., VENTURA, J. ¿ Se modifica la economía de carrera con el entrenamiento?. *Apunts Medicina del Deporte* 1989; Vol XXVI: 73-77.
39. VUORIMAA, T. Fundamentos de la carrera de resistencia. La economía de carrera y su control. *Cuadernos de atletismo* 30; 171-179.
40. MESSIER, S. P & CIRILLO, K. J. Effects of a verbal and visual feedback system on running technique, perceived exertion and running economy in female novice runner. *Journal-of-sports-science* 1989; 7(2): 113-126.
41. AURA, O & KOMI, P. The mechanical efficiency of locomotion in men and women with special emphasis on stretch-shortening cycle exercises. *European Journal of Applied Physiology* 1986; 55: 37-43.
42. BOSCO, C., TARKKA, I., KOMI P. Effect of elastic energy and myoelectric potentiation of triceps surae during stretch-shortening cycle exercise. *International Journal of Sports Medicine* 1982; 3: 137-140.
43. COMETTI, G. Los métodos modernos de musculación. Barcelona: Paidotribo. 1998; 74-78.
44. KANEKO, M., MATSUMOTO, M., ITO, A., FUCHIMOTO, T. Optimum step frequency in constant speed running. *Human Kinetics Publishers* 1987; 803-807.
45. CAVANAGH, P. R & RODGERS, M. M. Pressure distribution underneath the human foot. Biomechanics: current interdisciplinary research. Selected proceedings of the Fourth Meeting of the European Society of Biomechanics 1985; 85-95.
46. VAN-INGEN-SCHENAU, G. J., BOBBERT, M. F., DE-HAAN, A. Does elastic energy enhance work and efficiency in the stretch-shortening cycle. *Journal-of-applied-biomechanics* 1997; 13(4): 389-415.
47. SÁNCHEZ, F Y COLS. Análisis cinemático de la carrera en velocistas ciegos. Madrid. Consejo superior de deportes. 1996; 31-46.
48. CAVANAGH, P. R & WILLIAMS, K. The effect of stride variation on oxygen uptake during distance running. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 1982; 14: 34-35.
49. WILLIAMS, K. R., SNOW, R., AGRUSS, C. Changes in distance running kinematics with fatigue. *International-journal-of-sport-biomechanics* 1987; 7(2):138-162.
50. MCARDLE, W., KACTCH, F., KACTH, V. Fisiología del ejercicio. Madrid: Alianza deporte. 1990; 165-176.
51. FENG, D. Sports biomechanics research on the technique of Wang Junxia's 10.000 meters full run. *Sports-science* 1994; 14(3): 43-48.
52. PRICE, K. M. A biomechanical and physiological analysis of efficiency during different running paces. Microform Publications, Int'l Institute for Sport and Human Performance, Univ. of Oregon, Eugene, Ore. 1994.
53. HINRICHS, R.N., CAVANAGH, P. R., WILLIAMS, K. R. Upper extremity function in running. I: *Center of Mass and Propulsion Considerations* 1987; 3(3):222-241.
54. RODANO, R. Estudio biomecánico del pie. *Sport & Medicina* 1990; 1:30-35.
55. MORGAN, D.W & COLS. Short-term changes in 10-km race pace aerobic demand and gait mechanics following a bout of high-intensity distance running. *European-journal-of-applied-physiology-and-occupational-physiology* 1996; 73(3/4): 267-272.
56. RAMIRO, J., GARCÍA, A., FERRANDIS, R. Criterios de diseño del calzado deportivo. En: Ponencias de Jornadas sobre Biomecánica y Patomecánica del pie en el deporte. Valencia: IBV. 1992; 163-183.
57. FREDERICK, E. The energy cost of load carriage on the feet during running. Biomechanics IX-B, Champaign: Human Kinetics Publishers. 1985; 295-300.
58. GARCÍA, M Y LEIBAR, X. Entrenamiento de la resistencia en corredores de fondo y medio fondo. Madrid: Gymnos. 1997; 95-107.
59. ANSTRAND, P Y RODAHL, K. Fisiología del trabajo físico. Buenos aires: Panamericana, 1985; 228-389.
60. ALVAREZ, J. Estudio del comportamiento de la percepción subjetiva del esfuerzo en el umbral anaeróbico. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Complutense, 1994; 150-155.
61. PUJOL, P. Estrés térmico: aplicación de nueva tecnología. En: I Jornadas Internacionales de Fisiología del Ejercicio. Madrid: Ray-Ma. 1991; 28-33.
62. CÓRDOVA, A. La fatiga muscular y el rendimiento deportivo. Madrid: Síntesis. 1998; 233-243.