



Laureate International Universities

Periodización y Control del Entrenamiento en Corredores de Fondo

Tesis Doctoral

Jonathan Esteve Lanao

Doctorado en Actividad Física y Salud

Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte

Madrid, 2007



Laureate International Universities

Periodización y Control del Entrenamiento en Corredores de Fondo

Jonathan Esteve Lanao

Doctorado en Actividad Física y Salud

Director: Alejandro Lucía Mulas

Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte

Madrid, 2007

INDICE

AGRADECIMIENTOS	2
1.- INTRODUCCIÓN y ANTECEDENTES	5
Glosario de Términos	5
1.1.- Las pruebas	7
1.2.- Factores determinantes del rendimiento en carreras de fondo.....	9
1.3.- Predicción del rendimiento	21
1.4.- Evolución histórica del entrenamiento	33
1.5.- Adaptaciones longitudinales	37
1.6.- Componentes de la carga de entrenamiento	41
1.7.- Entrenamiento de los factores determinantes del rendimiento.....	49
1.8.- Sobreentrenamiento	61
1.9.- Estrategias de <i>Tapering</i>	69
1.10.- Periodización del entrenamiento	75
1.11.- Control del entrenamiento	85
2.- OBJETIVOS y DISEÑO GENERAL	93
3.- ESTUDIOS	97
Estudio 1: ¿Cómo se entrenan los corredores? Relación con el rendimiento en competición (<i>How do runners train? Relationship with competition performance</i>)	99
Estudio 2: Impacto de la distribución del entrenamiento en el rendimiento en resistencia (<i>Impact of training distribution on endurance performance</i>)	111
Estudio 3: El entrenamiento periodizado de la fuerza atenúa la pérdida de longitud de zancada en corredores de fondo (<i>Periodized strength training attenuates loss of stride length in endurance runners</i>)	121
Estudio 4: ¿Qué variables fisiológicas evaluadas durante un programa de entrenamiento se relacionan con el rendimiento en carrera de resistencia? (<i>Which physiological variables assessed over a training program are related with endurance running performance?</i>)	137
4.- DISCUSIÓN GENERAL y CONCLUSIONES	155

AGRADECIMIENTOS

Muchos corredores, cuando completan buenas carreras o incluso baten sus marcas, creen que los resultados que acaban de obtener eran mejorables. No es necesariamente insatisfacción crónica.

Del mismo modo, los trabajos de esta Tesis Doctoral son mejorables. Pero también es cierto que me creo sus resultados y hoy día trabajo con los atletas basado en esos criterios, buscando optimizar y mejorar sus programas y rendimiento, con nuevas propuestas experimentales, con métodos científicos.

Pero también en las mejores carreras, aunque el organismo ha sido llevado al límite como nunca, aparecen, paradójicamente, las mejores sensaciones. Esto no se estudia, pero cualquier corredor de fondo lo sabe.

Puedo asegurar que la realización de esta Tesis Doctoral, pese a lo costoso de la inversión, ha sido un placer y me ha permitido creer que comprendo finalmente la realidad del rendimiento y posibilidades de entrenamiento de las carreras de fondo.

Y del mismo modo que cuando se bate una marca personal todo el sacrificio y penurias de algunos días de entrenamiento quedan totalmente compensados, la presente Tesis me deja la sensación de que absolutamente todo lo que he estudiado, leído, visto y escuchado hasta el momento en relación al entrenamiento ha valido la pena. Y claro, habrá que celebrarlo, igual que cuando haces una buena carrera...

E igual que el corredor necesita compañeros y rivales para entrenar y competir y dar sentido a sus grandes o pequeños logros que refuerzan su autoestima, es justo agradecer a muchas personas su colaboración directa o indirecta en esta carrera.

Los corredores que han sido sujetos de los estudios de esta Tesis (y de otros trabajos) se merecen toda mi gratitud. Sin ellos ni hubiera podido hacer estos trabajos (que es lo de menos), ni sería nada como entrenador (mejor dicho, menos que ahora todavía!...).

Esto tiene para mí muchísimo valor, sobretodo porque hemos compartido tanto sacrificio y sufrimientos como diversión y

amistad (y alguna vez hasta resultados deportivos!... que aún siendo el principal motivo de encuentro, con el tiempo se ha convertido en el menor de los logros).

Con la misma honestidad le agradezco a mi Director de Tesis su trabajo: no podría haber tenido otro mejor que él.

Más allá, siempre he creído exagerados los agradecimientos universales en una tesis doctoral. También creo que en la vida apenas nada supone un antes y un después, aparte de un nacimiento, y a ese nivel, sin duda, una tesis doctoral, por mucho esfuerzo que suponga, creo que no alcanza la categoría de excepción. Pero también pienso que son pocos los momentos en los que nos detenemos a echar la vista atrás, y que una de las actitudes que más valoro en las personas es la gratitud. Por todo ello, pecando otra vez de poco original, me apetece dedicar y agradecer a las siguientes personas lo que representa el esfuerzo de este trabajo. Se lo dedico, en definitiva, a nuestro encuentro en esta vida.

Así pues, Gracias también a todos los co-autores de los estudios, y a mis compañeros de trabajo de la Universidad Europea de Madrid, con quienes me siento en deuda por no compartir más tiempo libre con ellos en mi atareada y azarosa vida. Injustamente me limitaré a citar a Alfonso Jiménez y Fernando Naclerio (por aquello de ser "compañeros de zulo" en el laboratorio... que de una vez vamos a llamarle "Laboratorio de Entrenamiento") y a mis jefes de departamento a lo largo de estos años (Susana, Jordi, Alfonso, Begoña). Todos me preguntaron aquello de "¿Y la tesis qué?". Gracias porque siempre trataron de facilitarme las cosas en eso y en el resto de la actividad académica.

Y pese a que no tengamos trato más que puntual, por nuestros respectivos quehaceres, quiero dedicar muy especialmente este trabajo a Juan Mayorga. Porque no es casualidad que mi humilde trayectoria profesional, de la que sin embargo estoy orgulloso en el mejor sentido de la palabra, haya seguido la senda que Juan ha ido abriendo desde su posición. Me siento muy afortunado de haber sido alumno de la 1ª promoción del Curso Puente de la UEM que gracias a Juan

salió adelante, de la 1ª promoción de licenciados de la UEM, de la 1ª promoción del Doctorado en Actividad Física y Salud, y de poder trabajar como técnico y como profesor en la UEM, y haber hecho esta Tesis Doctoral, así como otros estudios, en esta casa, bajo la mirada de este jefe capaz, amable, noble y humano. Nada de eso hubiera sido posible sin su mediación, igual que la carrera de tantos otros profesionales que han pasado por esta universidad.

Hay muchas otras personas que tampoco serán conscientes de lo importantes que han sido en mi trayectoria profesional. Será injusto olvidarme de algunos de ellos y no dedicarles más espacio (pero si habéis leído la Tesis ya abréis visto que se trata de ser breve, no?...). Gracias especialmente a aquellos que en momentos clave habéis confiado en mí... incluso más que yo mismo. Gracias Luís García "Paganini", Francisco Mestres y Marcelino Campayo por aceptar a alguien con tímidas actitudes y aptitudes para esto de correr, pero que soñó más que nadie con ganar un cross y todo lo que rodeaba los entrenamientos y las competiciones. Gracias a mi último entrenador, Quim, por enseñarme la actitud, y gracias sobretodo por, soportando con paciencia mis preguntas sobre el porqué de los entrenamientos, haber dicho un día aquello de "serás un gran entrenador", que tú habrás olvidado, pero a mí me animó por siempre a dedicarme a esto.

Gracias a todos mis compañero/as de entrenamiento en Lleida en mis inicios en el atletismo (Sícoris y CAL-UdL), y a todos los niños/as que entrené allí en las escuelas de atletismo del Joc de la Bola, Vilanova de la Barca y Escola Municipal d'Atletisme.

Gracias Sr Sarabia por darme el primer sueldo (que no fuera la paga de papá), recogiendo manzanas y llevando un tractor, y a Josep Pons, Manel Ortín, Ramón Blanch y Manuel Lapuente por darme trabajo enseñando atletismo a los niños (que, sinceramente, me gustaba más que lo otro de las peras y las manzanas...). Gracias a Paco Fuentes por lograme el primer trabajo en Madrid con el equipo de Atletismo de la Universidad (en vez del Telepizza, también una afortunada alternativa...).

Muchas gracias Susana Aznar por confiar en mí para trabajar de profe en la Universidad, y al apoyo de José Manuel Ballesteros pese al azaroso destino que lo hizo posible. Todavía hoy pienso que si hubiera sido mi jefe nunca hubiera contratado a alguien como yo...

Gracias a profesores como Juan Carlos Álvarez, Margarita Pérez o Alejandro Lucía que me dieron la base de lo que vine a buscar a Madrid: aprender a entrenar a atletas.

Perdón a todos aquellos que les hubiera hecho ilusión ver su nombre y seguro hubiera sido justo (pero sigo con el "chip" de sintetizar y escribir una tesis que algunos llaman de estilo "europeo", que será que suena a "moderno"... aunque para mí tiene aspecto de "TBO").

Gracias a mis amigos y compañeros de fatigas en el mundo de la música (al que espero volver), por su tiempo aprovechado en ensayos, viajes, actuaciones con más pena que gloria y un sinfín de avatares que sin duda fueron lo mejor. Entre ellos, a mis amigos de verdad, a quienes no olvido aunque no vaya a su encuentro, Gerard, Albert, Marc. Gracias también a Marta por todo lo bueno que nos brindamos y por si algo hemos aprendido de aquello.

Y si a alguien debo agradecer cualquier cosa de mi vida es a quienes menos lo he hecho. Perdón y Gracias, Mamá y Papá, por absolutamente todo, no hay nada más sincero y contundente que pueda decir con brevedad. Nunca lograré igualar todo lo bueno que habéis hecho por nosotros, y por eso siempre tendré una referencia. Gracias hermanos y hermana por aguantar a éste enano que parece que nunca se acuerda de vosotros. Gracias al resto de familiares cercanos en esta amplísima familia.

Y gracias, Claudia, Haza, Jordi y todos quienes me habéis querido, como yo, sin esperar nada a cambio, y por ello nos encontramos, tratando de aprender algo, en este camino de solitarios.

1.- INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

A continuación se desarrollan los apartados que sirven de marco teórico de los estudios realizados en la presente Tesis Doctoral. Aunque a lo largo del texto se aclaran las abreviaturas utilizadas conforme aparecen nuevos términos, aportamos un glosario de los más utilizados para facilitar una consulta rápida durante la lectura.

GLOSARIO DE ABREVIATURAS (por orden alfabético)

AOD: *Accumulated Oxygen Deficit*, Déficit acumulado de oxígeno

CAM: Capacidad Aeróbica Máxima

cm: centímetros

CMJ: *Countermovement Jump*, salto con contramovimiento

DMAO: Déficit Máximo Acumulado de Oxígeno

FC: Frecuencia Cardiac

FCmáx: Frecuencia Cardiac Máxima

h: horas

IR: Índice de Resistencia

JJOO: Juegos Olímpicos

km: kilómetros

L·min⁻¹: Litros por minuto (*consumo de oxígeno en*)

LA: Lactato

Ln: Logaritmo neperiano

LT: Lactate Threshold, Umbral láctico (*asociado a "primer umbral fisiológico"*)

LTP: Lactate Turn Point, Umbral de acumulación del lactato (*asociado a "segundo umbral fisiológico"*)

m: metros

m·s⁻¹: metros por segundo

MaxLASS: *Maximal Lactate Steady State*, Máximo estado estable del lactato

min: minutos

MKS: Máximo Kilometraje Semanal

ml: metros lisos

ml·kg⁻¹: Mililitros por kilogramo de peso corporal

ml·kg⁻¹·km⁻¹: Mililitros por kilogramo de peso corporal por kilómetro por hora (*coste energético en*)

ml·kg⁻¹·min⁻¹: Mililitros por kilogramo de peso corporal por minuto (*consumo de oxígeno en*)

MLSS: *Maximal Lactate Steady State*, Máximo estado estable del lactato

mMol·L⁻¹: milimoles por litro (*concentración de lactato en*)

PAM: Potencia Aeróbica Máxima

RCT: *Respiratory Compensation Threshold*, Umbral de compensación de la respiratoria (*asociada a "segundo umbral fisiológico"*)

RJ: *Repeated Jumps* o *Rebound Jumps*, saltos con rebotes

RM: Repetición Máxima

RPE: Percepción subjetiva de esfuerzo (*Rating of Perceived Exertion*)

RQ: *Respiratory Quocient*, Cociente respiratorio

s: segundos

SJ: *Squat Jump*, salto en posición de 1/2 sentadilla

SLS: *Stride Length / Speed*, amplitud de zancada / velocidad

UAN: Umbral Anaeróbico

V: velocidad (*corresponente o asociada a*)

VAM: Velocidad Aeróbica Máxima

VA_{máx}: velocidad mínima que solicita el VO₂max, equivalente a la Velocidad Aeróbica Máxima

VE/VCO₂: equivalente de dióxido de carbono

VE/VO₂: equivalente de oxígeno

Vmax: Velocidad máxima en un test progresivo. Equivalente a la Velocidad Pico

VO₂max: Consumo máximo de oxígeno

Vpico: Velocidad Pico

VT: *Ventilatory Threshold*, Umbral Ventilatorio (*asociada a "primer umbral fisiológico"*)

VT1: Primer umbral ventilatorio

VT2: Segundo umbral ventilatorio

vVO₂max: velocidad mínima que solicita el VO₂max, equivalente a la Velocidad Aeróbica Máxima

1.1.- Las pruebas

El atletismo es un deporte tradicional y emblemático, que se origina en acciones motrices básicas como lanzar, saltar, caminar o correr. Correr es considerado como el patrón de movimiento más extendido en los deportes (Anderson 1996). Las carreras de fondo estaban ya presentes en los Juegos Olímpicos (JJOO) de la era antigua. Aunque no conocemos nada del nivel de aquellos atletas (solo mitos y exageraciones sobre su rendimiento), se sabe que se sometían a una férrea disciplina de un entrenamiento que ya contemplaba diversos medios de entrenamientos, ciclos de programación y ciertos conceptos técnicos (Hegedüs 1984).

Las pruebas de carrera de la era antigua no eran las actuales. Se disputaban sobre múltiplos de la distancia del estadio (de 600 pies en línea recta, unos 192 metros en el estadio olímpico, algo inferior o superior según la ciudad, o mejor dicho, los pies para medirlo). La prueba de fondo se conocía como el "*dolikhos*", y su longitud variaba entre los 7 y los 24 estadios (~1300 a 4600 metros) (Vanhove *et al* 1992).

Distancias superiores, como el maratón, son pruebas modernas, pese a que su origen legendario sea de aquella época. La prueba de maratón en los primeros JJOO (Atenas 1896) y en maratones tan antiguos como el de Boston (1897) había sido de alrededor de 40 kms (Quercetani 1992) en honor a la distancia que separa Maratón de Atenas y el mito de Filípides. De hecho, la distancia oficial del maratón (42 km y 195m) se adopta a partir de los JJOO de Londres 1908, cuando se amplió para poder acercar la salida de la prueba al castillo de Windsor, residencia de la familia real británica, ya que la línea de meta debía estar frente al palco real en el estadio olímpico, tras 2/3 de vuelta a la pista.

Hoy en día parece aceptado que el mito de Filípides no fue tal y como se ha contado clásicamente, ni en su identidad ni en el recorrido ni en el mensaje del emisario.

Pero el origen de las competiciones modernas de carrera de fondo sí está en esos "corredores-mensajeros", como Filípides, que en la antigua Grecia eran conocidos como "*hemerodromoi*", en el Imperio Otomano como "*peichs*", y en la Inglaterra de inicios del siglo XIX como "*running footmen*".

En éstos últimos, derivado de las apuestas que empezaron a hacerse con ellos, aparecieron las primeras competiciones de las que se poseen datos objetivos de rendimiento, así como los primeros profesionales de las carreras, inicialmente entre la aristocracia.

Esas primeras competiciones eran por franjas temporales, contabilizándose la distancia recorrida en ese tiempo. Primero fueron carreras de 3 horas y posteriormente de más, de hasta 6 horas... ie incluso hasta de 6 días! (Hegedüs 1984)

Posteriormente, especialmente en Estados Unidos, se desarrollaron carreras por distancias, siendo carreras mucho más cortas y basadas en el sistema anglosajón de medida (pies, yardas y millas).

Con motivo de los primeros JJOO de la era moderna en 1896 se crea un programa de pruebas con distancias unificadas bajo el sistema métrico decimal. Estas distancias provienen tanto de múltiplos del antiguo estadio griego como de distancias con el sistema anglosajón de medida, y se han mantenido sin apenas modificaciones desde entonces (a excepción del maratón), y con rankings de récords mundiales desde 1914.

Actualmente existe un amplio abanico de competiciones, todas ellas por distancias fijas, que se descomponen en carreras de pista, ruta, campo a través y montaña. Éstas son clasificadas y reglamentadas por la Federación Internacional de Atletismo Amateur (IAAF), fundada en 1912.

La figura 1.1.1 muestra las pruebas oficiales de cada disciplina en los JJOO y Campeonatos del Mundo. En dichas pruebas (excepto campo a través) se homologan las marcas, se establecen rankings de todos los tiempos y se compite a niveles desde aficionado a regional, estatal, continental o mundial.

Clásicamente estas distancias y disciplinas han sido clasificadas como mediofondo, fondo o ultrafondo, aunque modernamente las fronteras entre unas y otras pruebas no están tan claras, fruto de un cambio de concepción del entrenamiento necesario para el rendimiento en las mismas.

En definitiva, esto guarda relación directa con las necesidades fisiológicas de cada evento. Y es importante observar que las carreras de fondo cubren todo el espectro de intensidades fisiológicas abarcable, a diferencia de otros deportes de resistencia.

Así, las pruebas de ultrafondo, como los 100kms se disputan presumiblemente alrededor de primer umbral (VT1, umbral láctico, etc) (Péronnet *et al* 2001), mientras que las pruebas de maratón y media maratón se realizan alrededor del "umbral anaeróbico" (VT2, máximo estado estable del lactato, etc...) (O'Brien *et al* 1993, Föhrenbach *et al* 1987, Billat *et al* 1994). Las pruebas como los 10k y el campo a través se desarrollan por encima de VT2 y por debajo de VO₂max (Billat 2002) pero con una contribución anaeróbica de cierta importancia (Bulbulian *et al* 1986) y las pruebas de 5000 a 3000 metros se desarrollan presumiblemente muy cerca de VO₂max (Péronnet *et*

al 2001). La contribución anaeróbica cobra todavía mayor importancia conforma las distancias son menores, aunque todavía en los 800 y 1500m la proporción aeróbica total es superior a la anaeróbica (Spencer *et al* 2001, Spencer *et al* 1996, Lacour *et al* 1990).

Figura 1.1.1

Pruebas oficiales de carreras de fondo en JJOO y Campeonatos del Mundo en cada disciplina (no se incluyen las carreras de montaña)

PISTA CUBIERTA

800 ml
1500 ml
3000 ml

ruta

1/2 maratón (21097m) (*)
Maratón (42195m)
100 kms (*)

PISTA AIRE LIBRE

800 ml
1500 ml
3000 m obstáculos
5000 ml
10000 ml

CAMPO A TRAVÉS (*)

(distancia única alrededor de 12kms, si bien entre las temporadas 01/02 y 05/06 se disputó también cross corto de 4kms)

(*) Estas pruebas tienen campeonato del mundo pero no forman parte del programa que se desarrolla tanto en JJOO como en Campeonatos del Mundo. Existen otras distancias oficiales aunque de menor relevancia y fuera del programa olímpico.

Hegedüs J. La ciencia del entrenamiento deportivo. Stadium, Buenos Aires 1984.

Lacour JR, Bouvat E, Barthelemy JC. Post-Competition blood lactate concentrations as indicators of anaerobic energy expenditure during 400-m and 800-m races. *Eur J Appl Physiol* 1990;61:172-176.

O'Brien MJ, Viguie CA, Mazzeo RS, Brokks GA. Carbohydrate dependence during marathon running. *Med Sci Sports Exerc* 1993;25:1009-1017.

Péronnet F (coord) Maratón. INDE, Barcelona 2001.

Quercetani RL. Historia del atletismo mundial 1860/1991. Debate, Madrid 1992.

Spencer MR, Gastin PB, Payne WR. Energy system contribution during 400 to 1500 meters running. *New Studies Athl* 11: 59-65, 1996

Spencer MR, Gastin PB. Energy system contribution during 200- to 1500-m running in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:157-162.

Vanhove D, Laporte W, Bultiauw P, Raepsaet G, Hemelryk J. pág 113. Las disciplinas deportivas. EN: El deporte en la antigua Grecia. La génesis del olimpismo. Fundación La Caixa, Barcelona 1992.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ESTE APARTADO:

Anderson T. Biomechanics of running economy. *Sports Med* 1996;22:76-89.

Billat V. Fisiología y metodología del entrenamiento : De la teoría a la práctica. Paidotribo, Barcelona 2002.

Billat V, Bernard O, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein JP. Time to exhaustion at VO2max and lactate steady state velocity in sub elite long-distance runners. *Arch Int Physiol Biochim Biophys* 1994;102:215-219.

Bulbulian R, Wilcox AR, Darabos BL. Anaerobic contribution to distance running performance of trained cross-country runners. *Med Sci Sports Exerc* 1986;18:107-113.

Föhrenbach R, Madr A, Hollmann W. Determination of endurance capacity and prediction of exercise intensities for training and competition in marathon runners. *Int J Sports Med* 1987;8:11-18.

1.2.- Factores determinantes del rendimiento

El rendimiento del atleta de resistencia requiere la integración de muchos factores, algunos de ellos genéticos, algunos que pueden entrenarse, otros susceptibles de ser aprendidos, y otros incluso fuera del control de corredor y entrenador. Además de lo individual influyen también elementos sociológicos, y en el momento de la competición es especialmente importante lograr una óptima integración de lo técnico, lo táctico, lo fisiológico y lo psicológico (Smith 2003).

En otros términos, se requiere de un nivel de rendimiento inicial alto y especialmente de un ritmo de mejora alto (lo cual viene marcado a su vez por genética y entrenamiento), siempre acompañados de una psicología óptima, para entrenar y competir adecuadamente.

De cara al entrenamiento, la bibliografía señala habitualmente a los factores fisiológicos, y en ellos integraremos los biomecánicos. Parece comúnmente aceptado indicar los siguientes factores (con pequeñas variaciones en la terminología) (Brandon 1995, O'Toole y Douglas 1995, Jones y Carter 2000, Hauswirth y Lehénaff 2001):

-POTENCIA AERÓBICA y VO₂MAX

-CAPACIDAD AERÓBICA:

UMBRAL ANAERÓBICO o habilidad para MANTENER UN % DE VO₂MAX

-ECONOMÍA o EFICIENCIA ENERGÉTICA

-CAPACIDAD Y POTENCIA ANAERÓBICA (*)

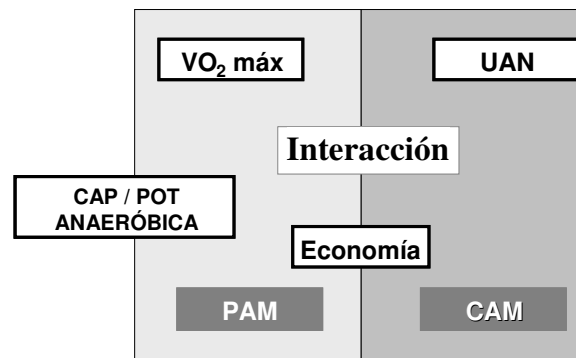
(*) de carácter glucolítico. En las pruebas de larga duración no se considera un limitante.

Aunque el concepto de VO₂max está próximo al de "potencia" (pues el VO₂ se expresa por unidad de tiempo), la "Potencia Aeróbica" es en el caso de las carreras de fondo una "velocidad", y como se explicará depende también de la economía de carrera. Por ello estos factores se expresan con mayor claridad en la figura 1.2.1. En dicha figura, la Capacidad Aeróbica Máxima (CAM), entendida como la "capacidad de mantenerse largo tiempo en la vía energética aeróbica", se refiere al umbral anaeróbico, entendiéndose éste como más representativo de ese concepto de cara al rendimiento en pruebas de no muy larga duración.

Pero si hablamos con propiedad, la "Capacidad Aeróbica Máxima" no existe, o en todo caso duraría toda la vida de una persona, si nos ceñimos al concepto de "tiempo en una vía energética", ya que la vía aeróbica siempre está presente (Péronnet *et al* 2001)

Se entiende que dichos factores interaccionan entre ellos, de modo que ciertas carencias en uno pueden compensarse con un destacado nivel en otro/s (Brandon *et al* 1995). Variables como la velocidad mínima que solicita el VO₂max (conocida más habitualmente como VAM o vVO₂max) se concibe como un compendio de VO₂max y economía de carrera, por ejemplo (Noakes 2003, Daniels y Daniels 1992).

Figura 1.2.1
Factores determinantes del rendimiento en deportes de resistencia



VO₂max: consumo máximo de oxígeno, que se identifica como Potencia Aeróbica Máxima o PAM); UAN: umbral anaeróbico (se relaciona con el concepto de Capacidad Aeróbica Máxima o CAM) ; CAP/POT anaeróbica: capacidad y potencia anaeróbica.

VO₂max

El interés por los determinantes fisiológicos del rendimiento atlético proviene de principios de siglo XX (Noakes 1988). Los primeros estudios se centraron en la valoración del máximo consumo de oxígeno (VO₂max). Su determinación pudo hacerse ya gracias al empeño de Hill y colaboradores entre 1922 y 1925, con los llamados sacos de Douglas. En 1929, Knipping había desarrollado la ergoespirometría, que permitía un registro continuo de la respiración y el metabolismo gaseoso. Sin embargo, estos sistemas cerrados de espirometría no lograron medir valores elevados de VO₂ hasta 1954 gracias al grupo de Hollman (Hollman 2001).

Éste se definió como la capacidad del organismo de absorber, transportar y consumir oxígeno por unidad de tiempo (Åstrand y Rodahl, 1986). Este VO₂max se determina habitualmente en pruebas incrementales hasta la extenuación, a partir de diversos criterios, especialmente el de meseta en el VO₂ pese al incremento de la carga de trabajo (Mc Ardle *et al* 2004). Originariamente se realizaba en tandas constantes, que en definitiva muestran una situación más real, al tener que mantener por más tiempo esa intensidad, no solo unos segundos. El VO₂max se expresa en valor absoluto (unidad de

capacidad por tiempo: $L \cdot \text{min}^{-1}$) o relativo (dividido por el peso corporal: $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

Los primeros estudios ya mostraron que los valores más altos de VO_2max relativo eran los de los mejores deportistas de resistencia (Åstrand 1955, Robinson *et al* 1937, Herbst 1928).

Los niveles de corredores de élite de resistencia pueden entre duplicar y casi cuadruplicar a los de personas con muy bajo nivel de condición física. Así, los valores habituales en hombres mediodondistas oscilan entre 70 y 85 $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. En mujeres por lo general los niveles rondan un 10-14% (60-75 $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) menos que en los hombres (Daniels y Daniels 1992, Péronnet y Thibault 1989). Sin embargo, en población con bajo nivel de condición aeróbica los niveles oscilan entre 40 y 20 $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. En esos niveles bajos o en niveles medios es el factor que mejor define el desarrollo cardiorrespiratorio, e incluso con poco entrenamiento se puede mejorar con relativa facilidad. Y pequeñas mejoras comportan ya grandes mejoras en la funcionalidad cardiorrespiratoria (Franklin 2000). Por todo ello el VO_2max es también conocido como "capacidad funcional" de una persona. Para Jones (2006), aunque otros trabajos clásicos no lo corroboran, lo habitual es que los corredores/as de 3000-5000 tengan los valores máximos, al competir a intensidades más cercanas al VO_2max .

Estudios de hace años indicaron que esta variable sería también el más importante para el rendimiento en resistencia (Foster 1983, Foster *et al* 1977, Costill *et al* 1973, Wyndham *et al* 1969, Saltin y Astrand 1967, Costill 1967). Pero hay que tener en cuenta que a partir de esos niveles de entrenamiento continuado este parámetro apenas se mejora (ver apartado 1.7) pese a mejorar el rendimiento, y que por tanto, otros elementos pueden ser más importantes. Por eso hoy en día se matiza que más bien este parámetro puede excluir de la posibilidad de alcanzar un nivel de elite si no se poseen unos mínimos, no siendo a partir de ahí sino uno más de los determinantes del éxito, especialmente en algunas pruebas (ver apartado de la intensidad fisiológica de las pruebas).

Estos límites mínimos no están definidos con precisión, pero se presume que rondan los 70 $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ en hombres. Es clásica, por ejemplo, la comparativa entre los dos corredores norteamericanos más famosos de los años setenta: Steve Prefontaine y Frank Shorter. Pese a obtener similares marcas, Prefontaine registró valores que todavía hoy están entre los más altos registrados en la historia (85 $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$), mientras que por el contrario los 71 $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ de Shorter (que sin embargo fue campeón olímpico), se hallan entre los más bajos registrados en corredores de elite) (Noakes 1992, Pollock 1977).

Lo que sí puede mejorarse por más tiempo es la velocidad a la que se desarrolla dicha potencia, es decir, que "corren más rápido con el mismo valor". Como veremos en el apartado 1.3, esta velocidad es de las mejores variables para predecir el rendimiento en una carrera de fondo (Daniels y Daniels 1992, Noakes *et al* 1990, Scrimgeour *et al* 1986). Pero por tanto esta variable se relaciona ya con los otros dos determinantes aeróbicos (economía y umbral anaeróbico).

Umbral Anaeróbico

Englobamos bajo ese término el concepto general de una intensidad fisiológica submáxima crítica a nivel metabólico, que según la metodología empleada recibe diversos nombres y localizaciones. Las primeras referencias de este concepto datan de Hollmann y Hettinger en 1959. En 1954 se inició el camino tratando de medir el piruvato, pero las dificultades hicieron que pronto se pasase al lactato. Su medición no anduvo exenta de dificultades, pues se tardaba 3 horas en obtener un resultado, aunque podían tomar 8 muestras simultáneas (Hollman 2001). Debido a ello se empezó a investigar su conexión con mediciones de potasio y el comportamiento de la ventilación (VE) y el equivalente de oxígeno VE/VO_2 .

Ya en 1964 y 1973, Wasserman y colaboradores emplearon el término "umbral anaeróbico", y los primeros criterios para determinar los umbrales ventilatorios (VT1 y VT2). Desde 1963 se intentó medir el lactato en sangre capilar, evitando punciones en arteria, como se hacía hasta entonces en la arterial braquial, con riesgos de hematoma periarterial y oclusión arterial por no poder usar plástico (Hollman 2001). En 1976 Mader destacó el valor de 4 $\text{mMol} \cdot \text{L}^{-1}$ como medida aproximada para deportistas de resistencia. En 1979 Kindermann y colaboradores hablan de un "primer umbral" del lactato con el criterio de "primer incremento del lactato desde el reposo", que Mader, y otros muy posteriormente, situarán alrededor de los 2 $\text{mMol} \cdot \text{L}^{-1}$. En 1981 Stegmann y colaboradores hablan del "Umbral Anaeróbico Individual". Tras numerosas propuestas de determinación desde las iniciales de Margaria en 1960 hasta la actualidad, aparece el concepto de máximo estado estable del lactato (siglas en inglés MLSS o MaxLASS) (Billat *et al* 2003) y desde entonces hasta hoy día se han matizado éstos y otros métodos (Visual, deflexión de la frecuencia cardiaca (Conconi *et al* 1982, Conconi *et al* 1980), D_{max} (Cheng *et al* 1992), pH, saliva, catecolaminas, amonio (Yuan *et al* 2002), incremento del ritmo respiratorio (Carey *et al* 2005) percepción, electromiografía...) Todo ello para establecer intensidades submáximas sin usar el lactato o mediciones espirométricas.

Se ha indicado que el VT2 es una intensidad ligeramente superior al MLSS (un 10% mayor de VO_2max), pese a estar relacionados en una misma población entrenada (Dekerle *et al* 2003). También en

ocasiones la deflexión de la FC sobreestima el umbral anaeróbico por otros métodos, aunque requiere más estudio (Bodner y Rhodes 2000).

Por ello y por su determinación parece que el concepto global de MLSS es más prudente y mejor controlable en el entrenamiento. El MLSS se logra, por definición, cuando la concentración final de lactato ha variado menos de $1 \text{ mMol}\cdot\text{L}^{-1}$ durante los últimos 20 minutos (min) de una intensidad constante (Heck et al 1985). Diversos autores sugieren repeticiones incluso más largas y con descansos más largos que la duración de la repetición (Billat et al 2003). Incluso se ha razonado que ésta supone la máxima velocidad en la que se puede medir un VO_2 constante, sin componente lento (Billat et al 2003), si bien esto puede ser discutible analizando el concepto y las causas del componente lento y el nivel de entrenamiento de la persona en cuestión.

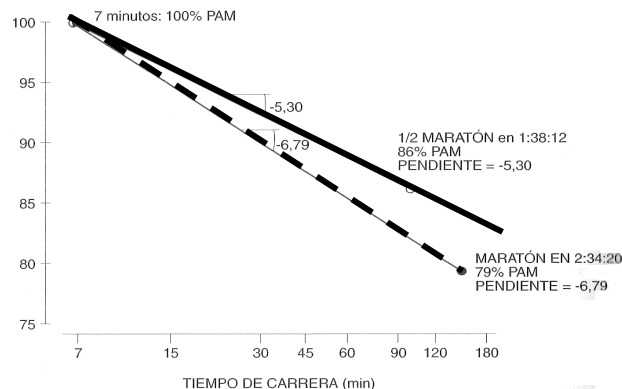
La concentración de lactato para ello puede ser muy variable, de 2 a $7 \text{ mMol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Billat et al 2003). Ésta depende del ejercicio realizado, de modo que a menos masa muscular mayor concentración (Beneke et al 1995), y aunque se presume que disminuye con el entrenamiento (Billat et al 2003) no se relaciona con el rendimiento (Myburgh et al 2001, Beneke et al 2000).

Lo mismo ocurre cuando lo que podemos englobar como "umbral anaeróbico" se representa por el porcentaje de VO_2max al que ocurre (Maldonado-Martín et al 2004), pues realmente es la velocidad de ese parámetro, en la metodología que se emplee, la que puede correlacionarse con el rendimiento. En esos casos corredores fondistas con elevadas prestaciones a umbral anaeróbico pueden alcanzar rendimientos superiores a los que poseen mejor $\text{VO}_2 \text{ max}$ pero peores prestaciones a umbral anaeróbico (Hagerman 1992, Farrell et al 1979,). La velocidad del MLSS supone una tasa de intercambio respiratorio de 1.00 (Beneke et al 2000) y se cree que puede mantenerse hasta alrededor de los 60 min en deportistas con alto grado de entrenamiento (Beneke et al 2006, Billat 1996, Gleser y Vogel 1973). En el punto 1.3 se amplía la información en relación al rendimiento y su valoración.

Otro concepto interesante es el de "máximo % del VO_2max que puede mantenerse durante un determinado tiempo de esfuerzo", representado en la figura 1.2.2, y que proponen Péronnet y colaboradores por primera vez en 1987.

Éstos no consideran como tal al umbral anaeróbico como un factor aislado, sino que lo consideran dentro de este concepto, que describe una caída lineal en la relación entre tiempo de competición y % VO_2max sostenido. Cuanto mejor es el nivel en este índice, menor es esa caída, por tanto, mayor % de VO_2max puede mantener conforme la duración de la carrera aumenta.

Figura 1.2.2
Concepto de Índice de Resistencia
y ejemplo de su diferencia entre dos corredores y
su repercusión en el rendimiento
(adaptado de Péronnet et al 2001)



Una definición de este concepto sería que "La Resistencia (o Índice de resistencia) es la reducción de la potencia relativa que puede ser mantenida cuando el tiempo total del esfuerzo es multiplicado por la constante e, base de logaritmos neperianos que vale 2,71828". La figura 1.2.3 aclara este cálculo.

Figura 1.2.3
Fórmula del Índice de Resistencia
y ejemplo de cálculo

ÍNDICE DE RESISTENCIA =

$\frac{\% \text{ de la PAM durante la carrera} - 100}{\ln(\text{ tiempo de carrera / tiempo límite})}$ (*)

(*): Estos autores asumen de forma standard los 7 minutos como valor de tiempo límite

Si el índice de un corredor es -5, esto supone que:

- $7 \times 2,71828 =$ durante 19 min 2 segundos mantiene el 95% de la PAM (porque restas 5 del 100%, ya que su índice hemos puesto como ejemplo que es -5)

- $7 \times 2,71828 \times 2,71828 =$ durante 51 min 43 segundos mantiene el 90% de la PAM (va bajando 5 porque el índice es -5)

- $7 \times 2,71828 \times 2,71828 \times 2,71828 =$ durante 2h 20 min 36 segundos mantiene el 85% de la PAM

Economía de carrera

Si el VO_2max representa la habilidad de generar mucha energía por unidad de tiempo y el umbral anaeróbico se relaciona con mantenerse mucho tiempo a una intensidad por debajo de la anterior, la economía representa la habilidad para gastar la menor energía a una determinada velocidad, o bien ir más rápido con un determinado coste energético. Por ello,

especialmente en pruebas largas, puede condicionar los otros dos aspectos.

Las mediciones del trabajo mecánico y la potencia desarrollada en la locomoción humana han valorado tanto el trabajo externo como interno, dando lugar a mediciones de la eficiencia muscular, bruta, neta, aparente, total, delta o instantánea (Cavanagh y Kram 1985). Todos los métodos tienen limitaciones y dependen de determinadas presunciones, por lo que la fiabilidad no puede ser determinada (Anderson 1996). Por otra parte no es posible medir la potencia mecánica desarrollada en carrera, dado que el organismo no es un sólido rígido.

La llamada economía de carrera es la variable utilizada para medir la relación entre velocidad y el coste energético, en VO_2 . Para su determinación se usan habitualmente intensidades moderadas (no cercanas a VO_2max) y durante tandas de mediana duración, de unos 6 a 10 minutos (min). Los motivos son varios. De una parte se sabe que a bajas o moderadas intensidades se tiende a alcanzar un estado estable del VO_2 en 3 min (Gaesser y Poole 1996), de ahí que los valores se toman a partir de ese momento y hasta el final del tiempo establecido.

Se sabe que la relación entre la velocidad y el VO_2 es lineal si se realiza un esfuerzo progresivo de no mucha duración desde muy baja intensidad hasta el máximo VO_2 . A velocidades constantes, especialmente muy bajas, es de esperar dicho gasto acorde a la tendencia lineal descrita, observando un VO_2 constante a partir de los 3'. Sin embargo, es posible que a intensidades superiores al primer umbral ventilatorio, exista un pequeño incremento progresivo del VO_2 , un "exceso de VO_2 " respecto a lo previsto, que recibe el nombre de "componente lento" del VO_2 , y con ello un empeoramiento de la economía (Gaesser y Poole 1996). Este concepto, que ha suscitado mucho interés en los últimos 20 años entre los investigadores, merece ser valorado en cada deportista, pues en definitiva rompe con la concepción de estados estables del VO_2 , y por ello puede que en algunos corredores disminuya la utilidad de determinadas recomendaciones derivadas de tests con estadíos de corta duración.

Por ello otro criterio ha sido conocer primero el umbral anaeróbico de la persona o el cociente respiratorio (inferior a 1.0), si bien los investigadores no se ponen e acuerdo sobre si el inicio del componente lento sería ya en el primer umbral o el segundo.

Pero la economía puede medirse incluso a intensidades superiores al umbral anaeróbico, porque aunque el coste energético es lineal respecto a la velocidad, esto no sería extensible a intensidades en las que las fuentes anaeróbicas cobran importancia. De ahí que en mediodfondistas coste energético sea distinto, pudiendo correr a altas y bajas velocidades con coste similar (Daniels y Daniels 1992, Daniels 1985), pues que compiten en velocidades que dependen tanto del

VO_2 max como de las fuentes anaeróbicas (Brandon y Boileau 1992, Boileau *et al* 1982), y poseen un perfil metabólico particular (ver intensidad metabólica y morfología atletas). Por ello la economía de carrera se muestra tremendamente específica de la velocidad (Berg 2003) y por ello algunos sugieren medirla a altas intensidades, incluso de un 95% de VO_2 max, evitando un aplanamiento de la curva de economía pero acercándose así a las velocidades competitivas (Daniels y Daniels 1992).

En el caso de corredores de la larga distancia, puede que evaluar la economía a velocidad competitiva por pocos minutos no discrimine el potencial real respecto a corredores de mediodfondo (Daniels y Daniels 1992) y quizá lo interesante sería medir la economía en situaciones de fatiga, pues se sabe que la economía se empeora tanto por el tiempo como por la intensidad (Sproule 1998, Xu y Montgomery 1995). Más importante aún es que en unos corredores el deterioro puede ser mayor que en otros, y que es independiente de que sean los más económicos inicialmente (Sproule 1998)

La economía de carrera fue inicialmente fue definida y valorada como el VO_2 en estado estable por kilo de peso a un determinado ritmo de carrera (Pollock 1977, Mayhew 1977, Costill y Winrow 1970), y modernamente se ha definido como el VO_2 por kilogramo de masa corporal por kilómetro (Bergh *et al* 1991).

Figura 1.2.4
Ejemplo del cálculo de la economía de carrera
en la expresión " $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ":

- El corredor ha mostrado una economía de 45,9 ml/kg/min a la velocidad de 14 km/hora
 - Transformamos en ritmo de minutos por kilómetro los 14 km/h, dividiendo 60 segundos entre 14 (=4,29)
 - Multiplicamos 4,29 por 45,9 = 196,7 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$
-

Esto permite comparar corredores medidos a diversas velocidades. Los corredores de elite se muestran más económicos que los de nivel inferior (Pate *et al* 1992). En corredores de similar nivel de VO_2max , la economía se ha mostrado como determinante (Brandon 1995). Todo esto ha quedado de manifiesto en un reciente trabajo que hemos publicado comparando la selección española de campo a través respecto a la selección subcampeona mundial, Eritrea, donde la superioridad de los africanos se manifiesta en la mejor economía de carrera (Lucía *et al* 2006), con algunos datos entre los mejores de la historia en cuanto a lo publicado en artículos científicos.

Di Prampero *et al* (1986) establecieron que la velocidad máxima (V_{max}) que un corredor puede mantener depende de la máxima potencia del corredor

y el coste energético de la carrera. Lógicamente aquellos corredores que tengan menor coste energético a una determinada velocidad tienen una ventaja de cara al rendimiento.

Capacidad y potencia anaeróbicas

Paralelamente, corredores mediofondistas con excepcional capacidad o potencia anaeróbica pueden compensar niveles bajos de $VO_2\text{max}$ (Brandon 1995).

A pesar de que la función aeróbica ha sido mucho más estudiada (Berg 2003), parecen existir evidencias para creer que limitaciones en el sistema muscular para producir potencia pueden limitar el rendimiento de resistencia (Paavolainen *et al* 2000, Paavolainen *et al* 1999a, Noakes 1988, Bulbulian *et al* 1986) especialmente los que controlan el grado y fuerza de la actividad del ciclo miofibrilar de los puentes cruzados, que incluye la actividad de la ATPasa y la cantidad de calcio ligado por la troponina C durante la contracción (Green y Patla 1992).

En este sentido, sin embargo, estos aspectos se han estudiado en menor medida. El motivo puede estar en parte razonado porque las fuentes energéticas anaeróbicas tienen sin embargo mucho mayores dificultades para su medición y prescripción de intensidades. Esta es más importante en pruebas de mediofondo de larga duración, permitiendo competir a mayores velocidades durante pruebas más largas (Brandon 1995, Di Prampero *et al* 1993, McKinzie *et al* 1982, Katch y Weltman 1979).

Pero la realidad es que, al margen de la potencia aeróbica y de la predominante contribución aeróbica de las pruebas de mediofondo y fondo, la contribución anaeróbica contribuye a determinar el rendimiento (Spencer *et al* 1996, Lacour *et al* 1990a), habiéndose hallado correlaciones entre el lactato post-competición y el rendimiento (Lacour *et al* 1990b) e incluso señalándose, en otros deportistas, como el factor clave para discriminar el rendimiento en esfuerzos de alrededor de 2 minutos (Foster *et al* 2003).

Incluso en las pruebas de campo a través se ha indicado que a igualdad de prestaciones aeróbicas entre los corredores que forman un mismo grupo en carrera, el margen para la victoria corresponderá a aquél con una mejor prestación del sistema anaeróbico (si aeróbicamente están igualados) (Bulbulian *et al* 1986).

Un método reconocido es evaluar el llamado máximo déficit de oxígeno acumulado (DMAO o MAOD, en inglés) originalmente desarrollado por Medbø *et al* (1988). Para ello se necesita de nuevo medir el VO_2 . La figura 1.2.5 muestra paso a paso estos cálculos.

Figura 1.2.5
Ejemplo del cálculo del Déficit Máximo Acumulado de Oxígeno (DMAO)
(adaptado de Billat 2002)

VAM (km·h⁻¹)	17
VO₂ max (ml·kg⁻¹·min⁻¹)	72
Velocidad (km·h⁻¹) donde estimar el DMOA	21
Intensidad a estimar (%VO₂ max)	124
(regla de 3 entre VAM y % a estimar)	
VO₂ necesario (ml·kg⁻¹·min⁻¹)	89
(regla de 3 entre VO ₂ max y VO ₂ necesario si se cubriera todo solo aeróbicamente)	
VO₂ necesario (ml·kg⁻¹·min⁻¹) cada 15 s	22
(dividir la cantidad anterior entre 4 para saberla cada 15 s)	
Total fracciones de 15 s empleadas	8
(según el tiempo total que logre aguantar, en este ejemplo supondremos que 2 minutos exactos)	
Total VO₂ necesario (ml·kg⁻¹·min⁻¹) (n veces x 15 s)	178
(multiplicar número de fracciones por estimación VO ₂ cada 15 s (22x8))	
Total VO₂ consumido (ml·kg⁻¹·min⁻¹)	119
(sumar VO ₂ real total cada 15 s)	
DMAO (ml·kg⁻¹)	59
(diferencia entre VO ₂ necesario y VO ₂ consumido, 178-119)	

VAM: Velocidad Aeróbica Máxima (Velocidad mínima que solicita un $VO_2\text{max}$; $VO_2\text{max}$: consumo máximo de oxígeno ; DMOA: Déficit Máximo de Oxígeno Acumulado.

Se trata de medir cuánto oxígeno haría falta para ejercitarse a un % superior al de la Potencia Aeróbica Máxima. Debe durar alrededor de 2 min (Green y Dawson 1993), pues de lo contrario la cantidad de ATP suministrada por el metabolismo anaeróbico puede no ser máxima. Así, la velocidad será entre el 110 y el 120% de la VAM (Billat 2002). Por ejemplo, imaginemos que queremos calcularlo al 120% de la Velocidad Aeróbica Máxima de carrera (ver figura 1.2.5). Se calcula por regla de 3 el VO_2 necesario, y luego se va midiendo el VO_2 real cada cierto lapso de tiempo, por ejemplo, cada 10 o 15s. Entonces se restan las necesidades del consumo real, en cifras totales durante el tiempo total (Billat 2002). Cuanto mayor es la diferencia mayor es el DMAO. También se puede calcular por regresión el VO_2 / Velocidad, algo que puede hacerse desde intensidades incluso inferiores al umbral de 4 mMol·L⁻¹ de lactato (Reis *et al* 2005).

También se ha recalcado la importancia del entrenamiento de fuerza (Jung *et al* 2003). Dado que la fuerza como tal no se indica como directo factor

determinante del rendimiento, habrá que buscar si su desarrollo puede influir a su vez en la mejora de alguno de estos factores. Así mismo, habrá que identificar qué manifestación/es de la fuerza son responsables de dichas mejoras y de qué manera controlar su entrenamiento.

Muchos estudios sobre el efecto del entrenamiento de la fuerza en deportistas de resistencia se han orientado a buscar modificaciones de dichos factores fruto de la inclusión de entrenamientos de fuerza. Estos trabajos pueden encontrarse en la literatura científica occidental desde los años ochenta, si bien trabajos previos se realizaron ya en los países bajo influencia soviética desde una quincena de años antes.

Sintetizando los resultados de dichos trabajos, parece que en los dos primeros factores (VO_2 max y Umbral Anaeróbico) no hay mejora, salvo en corredores de bajo nivel (Kaikkonen *et al* 2000, McCarthy *et al* 1995, Haennel *et al* 1989, Stone *et al* 1983, Gettman *et al* 1982, Gettman *et al* 1978) mientras que en deportistas entrenados como corredores, ciclistas o esquiadores de fondo, el estímulo se ha mostrado insuficiente (Paavolainen *et al* 1999a, Nicholson y Sleivert 1999, Johnston *et al* 1997, Paavolainen *et al* 1991, Hickson *et al* 1988).

Por ello, pese a que se ha sugerido la transferencia de las mejoras neuromusculares al rendimiento de resistencia (Paavolainen 1999a), hay que tomar con cautela el concepto de que el entrenamiento de fuerza tenga el potencial de propiciar las mejoras anaeróbicas que puede requerir el rendimiento en resistencia, pues parece que dichas mejoras lo que propician son habitualmente mejoras de la economía (Jung 2003). Un motivo podría ser la mayor fortaleza de las fibras rápidas, al ser reclutadas en las intensidades superiores en las pruebas incrementales (Tanaka y Swensen 1998) por una fatiga más retardada de las fibras lentas. Esta economía es un factor en el que sí se han hallado mejoras, tanto en corredores y corredoras (Saunders *et al* 2004b, Spurrs *et al* 2003, Braun *et al* 2000, Turner *et al* 1999, Johnston *et al* 1997) Braun *et al* (2000) sólo hallaron mejoras a bajas intensidades y no a altas, con corredores.

Para explicar las mejoras en la economía se han sugerido básicamente dos mecanismos, uno en relación a mejoras nerviosas de la fuerza y otro en relación a mejoras de la rigidez músculo-tendinosa. Es pues importante destacar que las mejoras no se han visto causadas por cambios en la cinética del VO_2 , aunque solo dos trabajos hasta la fecha parecen haber estudiado dichos aspectos (Millet *et al* 2002, Womack *et al* 2000).

Al respecto del primer grupo de mecanismos, se entiende que la mejora de la fuerza máxima supondría en definitiva una menor sollicitación al sistema muscular.

Se ha sugerido que sería un menor número de fibras las que deberían activarse al pasar éstas a ser más fuertes (Tanaka y Swensen 1989), más coordinadas (Hoff *et al* 1999), o que al reducirse el % de fuerza máxima solicitado para un mismo nivel de tensión requerido, pasarían a participar más fibras lentas, más eficientes en cuanto al consumo aeróbico (Millet *et al* 2002).

En cuanto al segundo mecanismo propuesto, la mejora de la rigidez músculo-tendinosa (llamada "*stiffness*"), ésta sí ha sido medida en el caso de Millet y colaboradores (2002) obteniéndose mejoras de un 3%, y ha sido sugerida en diversos trabajos como mecanismo probable de especial importancia en la carrera (Saunders *et al* 2004, Jung 2003, Paavolainen *et al* 1999a).

Durante la acción de carrera, el sistema nervioso central coordina las acciones de los músculos en la pierna de apoyo junto con tendones y ligamentos, de modo que todo el conjunto se comporta de forma similar a un muelle con una masa. Los tensores son los músculos y los muelles propiamente serían los tendones, y la rigidez de ese sistema se conoce como "*stiffness*". En la carrera de fondo, esa capacidad de rigidizar el miembro inferior en el momento del apoyo conferiría una ventaja mecánica, traducida en ahorro energético (Novacheck 1998).

Consideraciones generales

En los inicios de la fisiología del ejercicio la atención se centró en los aspectos relacionados con el aporte y consumo de O_2 (Noakes 1988) y hasta ahora la función aeróbica ha sido mucho más estudiada (Berg 2003). Diversos autores reclaman desde finales de los años ochenta más atención a los factores relacionados con la contractilidad muscular, pues pueden resultar, como ya se indicó, limitantes del rendimiento (Paavolainen *et al* 2000, Paavolainen *et al* 1999a, Green y Patla 1992, Noakes *et al* 1988).

En definitiva, estos cuatro factores constituyen en última instancia los determinantes del rendimiento. Todos los demás factores que se puedan atribuir deben permitir optimizar alguno de los indicados.

Y aunque se ha indicado que son independientes, interaccionan para producir un rendimiento.

Esto se observa por ejemplo en la velocidad mínima que solicita el VO_2 max (conocida como VAM). Ésta representa un compendio entre VO_2 max y economía (Daniels y Daniels 1992). El tiempo límite a esa velocidad depende de una buena capacidad anaeróbica y factores neuromusculares (Billat 2002, Paavolainen *et al* 2000, Noakes 1988) pero en corredores con igual VO_2 max también depende mucho de su umbral anaeróbico (Billat *et al* 1994). En este ejemplo vemos pues una interacción de los cuatro factores tanto en la habilidad para desarrollar una alta VAM como para mantenerla.

Pero también se ha indicado que la importancia de estos factores es relativa en cada prueba, hasta el punto de que en las pruebas por encima de 10kms la capacidad anaeróbica ya no es relevante para la marca personal (puede que sí para una prueba táctica). Sin embargo, para pruebas cortas (del 5000 hacia menos distancia), la capacidad anaeróbica es determinante, y por el contrario el % de VO₂max mantenido no lo sería (Péronnet *et al* 2001). Posiblemente la economía medida a intensidades medias o bajas tampoco (Daniels y Daniels 1992).

Por ello, una cuestión de gran importancia, habida cuenta de los diversos perfiles fisiológicos de los corredores, es saber si los niveles excepcionales para más de un factor son mutuamente exclusivos (Joyner 1991) o hasta qué punto en cada prueba es preciso un mínimo o es posible seguir mejorando ciertos niveles. En los apartados 1.3 y 1.11 profundizaremos en estas cuestiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ESTE APARTADO:

Åstrand PO (citado por Noakes *et al* 1990). New records in human power. *Nature* 176,922-923.

Åstrand PO, Rodahl K. Textbook of work physiology. New York: McGraw-Hill, pp423-427, 1986.

Beneke R. Transitioning distance specialists (1 hour) to long metric events. May 27th-28th. USSF Coaches Seminar. Salt Lake City, 2006.

Beneke R, Hutler M, Leithauser RM. Maximal lactate-steady-state independent of performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:1135-1139.

Beneke R. Anaerobic threshold, individual anaerobic threshold, and maximal lactate steady state in rowing. *Med Sci Sports Exerc* 1995;27:863-867.

Berg K. Endurance training and performance in runners: research limitations and unanswered questions. *Sports Med* 2003;33:59-73.

Bergh U, Sjödín B, Forsberg A. The relationship between body mass and oxygen uptake during running in humans. *Med Sci Sports Exerc* 1991;23: 205-211.

Billat VL, Sirvent P, Py G, Koralsztein JP, Mercier J. The concept of maximal lactate steady state: a bridge between biochemistry, physiology and sport science. *Sports Med*. 2003;33:407-426.

Billat V. Fisiología y Metodología del Entrenamiento. Paidotribo, Barcelona 2002.

Billat LV. Use of blood lactate measurements for prediction of exercise performance and for control of training. Recommendations for long-distance running. *Sports Med* 1996;22:157-175.

Billat V, Bernard O, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein JP. Time to exhaustion at VO₂ max and lactate steady-state velocity in sub-elite long-distance runners. *Arch Int Physiol Biochem* 1994;102:10-15.

Bodner ME, Rhodes EC. A review of the concept of the heart rate deflection point. *Sports Med* 2000;30:31-46.

Boileau RA, Mayhew JL, Riner WF. Physiological characteristics of elite middle and long distance runners. *Can J Appl Sports Sci* 1982;7:167-172.

Brandon LJ, Boileau RA. Influence of metabolic, mechanical and physique variables on middle distance running. *J Sports Med Phys Fitness* 1992;32:1-9.

Brandon JL. Physiological factors associated with middle distance running performance. *Sports Med* 1995;19:268-277.

Braun WA, Flynn MG, Gerth M, Smith K. The effect of strength training on endurance run performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32, Supplement abstract 654.

Bulbulian R, Wilcox AR, Darabos BL. Anaerobic contribution to distance running performance of trained cross-country runners. *Med Sci Sports Exerc* 1986;18:107-113.

Carey DG, Schwarz LA, Pliego GJ, Raymond RL. Respiratory Rate is a valid and reliable marker for the anaerobic threshold: implications for measuring change in fitness. *J Sports Sci Med* 2005;4:482-488.

Cavanagh PR, Kram R. The efficiency of human movement - a statement of the problem. *Med Sci Sports Exerc* 1985;17:304-308.

Cheng B, Kuipers H, Snyder AC, Keizer HA, Jeukendrup A, Hesselink M. A new approach for the determination of ventilatory and lactate thresholds. *Int J Sports Med* 1992;13:518-522.

Conconi F, Ferrari M, Ziglio PG, Droghetti P, Codeca L. Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners. *J Appl Physiol* 1982;52:869-873.

Conconi F, Ferrari M, Ziglio PG, Droghetti P, Codeca L. [Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field in man](italiano) *Boll Soc Ital Biol Sper* 1980;56:2504-2510.

- Costill DL, Thomason H, Roberts E. Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med Sci Sports* 1973;5:248-252.
- Costill D, Winrow E. A comparison of two middle-aged ultramarathon runners. *Res Q* 1970;41:135-139.
- Costill DL. The relationship between selected physiological variables and distance running performance. *J Sports Med Phys Fitness* 1967;7:61-66.
- Daniels J, Daniels N. Running economy of elite male and elite female runners. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:483-489.
- Daniels J. A physiologist' view of running economy. *Med Sci Sports Exerc* 1985;17:332-338.
- Dekerle J, Baron B, Dupont L, Vanvelcenaher J, Pelayo P. Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. *Eur J Appl Physiol* 2003;89:281-288.
- Di Prampero PE, Capella C, Pagliaro P. Energetics of best performances in middle-distance running. *J Appl Physiol* 1993;74:2318-2324.
- Di Prampero PE, Atchou G, Bruckner JC, Moia C. The energetics of endurance running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1986;55:259-266.
- Farrell PA, Wilmore JH, Coyle EF, Billing JE, Costill DL. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports* 1979;11:338-344.
- Foster C, De Koning JJ, Hettinga F, Lampen J, La Clair KL, Dodge C, Bobbert M, Porcari JP. Pattern of energy expenditure during simulated competition. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35:826-831.
- Foster C. VO₂max and training indices as determinants of competitive running performance. *J Sports Sci* 1983;1:13-22.
- Foster C, Daniels JT, Yarborough RA. Physiological and training correlatos of maratón running performance. *Austr J Sports Med* 1977;9:58-61.
- Franklin BA. Cardiovascular responses to exercise and training. EN: Garret WE, Kierkendall DT. Exercise and Sport Sciences. Lippincott, Williams & Wilkins, Philadelphia 2000.
- Gaesser GA, Poole DC. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. En: Holloszy JO (ed). Exercise and Sport Science Reviews, vol 24. Williams & Willkins, Baltimore, pp 35-70, 1996.
- Gettman LR, Ward P, Hagan RD. A comparison of combined running and weight training with circuit weight training. *Med Sci Sports Exerc* 1982;14:229-234.
- Gettman LR, Ayres JJ, Pollock ML et al. The effect of circuit weight training on strength, cardiorespiratory function, and body composition of adult men. *Med Sci Sports Exerc* 1978;10:171-176.
- Gleser MA, Vogel JA. Endurance capacity for prolonged exercise on the bicycle ergometer. *J Appl Physiol* 1973;34:438-442.
- Green S, Dawson B. Measurement of anaerobic capacities in humans. *Sports Med* 1993;15:312-327.
- Green HJ y Patla AE. Maximal aerobic power: neuromuscular and metabolic considerations. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:38-46.
- Haennel R, Teo KK, Quinney A et al. Effects of hydraulic circuit training on cardiovascular function. *Med Sci Sports Exerc* 1989;21:605-612.
- Hauswirth C, Lehénaff D. Physiological demands of running during long distance runs and triathlons. *Sports Med* 2001;31:679-689.
- Hagerman FC. Energy metabolism and fuel utilization. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24(Suppl):S309-S314.
- Heck H, Mader A, Hess G, Mucke S, Muller R, Hollmann W. Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *Int J Sports Med* 1985;6:117-130.
- Herbst R (citado por Noakes *et al* 1990). Der gastoffwechsel als mab der körperlichen leistungsfahigkeit. *Deutsches Archives fur Linese Medizin* 1977;162:33-50.
- Hickson RC, Dvorak BA, Gorostiaga EM. Potential for strength and endurance to amplify endurance performance. *J Appl Physiol* 1988;65:2285-2290.
- Hollman W. 42 years ago – development of the concepts of ventilatory and lactate threshold. *Sports Med* 2001;31:315-320.
- Jones AM. The physiology of the World Record Holder for the Women's Marathon. *Int J Sports Sci and Coaching* 2006;1:101-116.
- Johnston RE, Quinn TJ, Kertzer R, Vroman NB. Strength Training in female distance runners: Impact on running economy. *J Strength and Cond Res* 1997;11:224-229.
- Joyner M. Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *J Appl Physiol* 1991;70:683-687.

- Jung AP. The impact of resistance training on distance running performance. *Sports Med* 2003;33:539-552.
- Kaikkonen H, Yrjama M, Siljander E. The effect of heart rate controlled low resistance circuit weight training and endurance on maximal aerobic power in sedentary adults. *Scand J Med Sci Sports* 2000;10:211-215.
- Katch VL, Weltman A. Interrelationships between anaerobic power output, anaerobic capacity and aerobic power. *Ergonomics* 1979;22:325-332.
- Kindermann W, Simon G, Keul J. The significance of the aerobic-anaerobic determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol* 1979;42:25-34.
- Lacour JR, Padilla-Magunacelaya S, Barthelemy JC, Dormois D. The energetics of middle-distance running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1990a;60:38-43.
- Lacour JR, Bouvat E, Barthelemy JC. Post-Competition blood lactate concentrations as indicators of anaerobic energy expenditure during 400-m and 800-m races. *Eur J Appl Physiol* 1990b;61:172-176.
- Lucia A, Esteve-Lanao J, Oliván J, Gomez-Gallego F, San Juan AF, Santiago C, Perez M, Chamorro-Vina C, Foster C. Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Appl Physiol Nutr Metab* 2006;31:530-540.
- McCarthy JP, Agre J, Graf B, Pozniak M, Vailas A. Compatibility of adaptive responses with combining strength and endurance training. *Med Sci Sports Exerc* 1995;27:429-436.
- Maldonado-Martin S, Mujika I, Padilla S. Physiological variables to use in the gender comparison in highly trained runners. *J Sports Med Phys Fitness* 2004;44:8-14.
- Mayhew JL. Oxygen cost and energy expenditure of running in trained runners. *Br J Sports Med* 1977;11:116-121.
- McKinzie DC, Parkhouse Ws, Hearst WE. Anaerobic performance characteristics of elite Canadian 800 meter runners. *Can J Appl Sports Sci* 1982;7:158-160.
- Millet GP, Jaouen B, Borrani F, Candau R. Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and VO₂ kinetics. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:1351-1359.
- Myburgh KH, Viljoen A, Tereblanche S. Plasma lactate concentrations for self-selected maximal effort lasting 1 h. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:152-156.
- Medbø JL, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted OM. Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol* 1988;64:50-60.
- Nicholson RM, Sleivert GG. Impact of concurrent resistance and endurance training upon distance running performance. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31: Supplement abstract 1559.
- Noakes T. Lore of Running (4th ed). Human Kinetics, Champaign-IL, 2003.
- Noakes T. Lore of Running (3rd ed). Oxford University Press, Oxford, 1992.
- Noakes TD, Myburgh KH, Schall R. Peak treadmill running velocity during the VO₂ max test predicts running performance. *J Sports Sci* 1990;8:35-45.
- Noakes T. Implications of exercise testing for prediction of athletics performance: a contemporary perspective. *Med Sci Sports Exerc* 1988;20:319-330.
- Novacheck TF. The biomechanics of running. *Gait Posture* 1998;7:77-95.
- O'Toole ML, Douglas PS. Applied physiology of triathlon. *Sports Med* 1995;19:251-267.
- Paavolainen L, Nummela A, Rusko H. Muscle power factors and VO₂max as determinants of horizontal and uphill running performance. *Scand J Med Sci Sports* 2000;10:286-291.
- Paavolainen L, Häkkinen K, Hämmäläinen I, Nummela A, Rusko H. Explosive-strength training improves 5-Km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol* 1999a;86:1527-1533.
- Paavolainen L, Nummela A, Rusko H, Häkkinen K. Neuromuscular characteristics and fatigue during 10km running. *Int J Sports Med* 1999b;20:516-521.
- Paavolainen L, Hakkinen K, Rusko H. Effects of explosive type strength training on physical performance characteristics in cross-country skiers. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1991; 62:251-255.
- Pate RR, Macera CA, Bailey SP, Bartoli WP, Powell KE. Physiological, anthropometric, and training correlates of running economy. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:1128-1133.
- Péronnet F (coord) Maratón. INDE, Barcelona 2001.
- Péronnet F, Thibault G. Mathematical analysis of running performance and world running records. *J Appl Physiol* 1989;67:453-465.

Péronnet F, Thibault G, Rhodes EC, McKenzie DC. Correlation between ventilatory threshold and endurance capability in marathon runners. *Med Sci Sports Exerc* 1987;19:610-615.

Pollock M. (citado por Anderson 1996 y Noakes 1992) Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners. Part I: cardiorespiratory aspects. *Ann NY Acad Sci* 1977;301:361-370

Reis VM, Silva AJ, Acensao A, Duarte JA. Inclusion of exercise intensities above the lactate threshold in VO_2 /running speed regression does not improve the precision of accumulated oxygen deficit estimation in endurance-trained runners. *J Sports Sci Med* 2005;4:455-462.

Robinson S, Edwards HT, Dill DB (citado por Noakes *et al* 1990). New records in human power. *Science* 1937;85:409-410.

Saltin B, Åstrand PO. Maximal oxygen uptake in athletes. *J Appl Physiol* 1967;23:353-358.

Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Peltola EM, Cunningham RB, Hawley JA. Nine Weeks of Plyometric Training Improves Running Economy in Highly Trained Distance Runners. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36:Suppl abstract 1745.

Smith DJ. A framework for understanding the training process leading to elite performance. *Sports Med* 2003;33:1103-1126.

Smith D, Telford R, Peltola E, Tumilty D. Protocols for the Physiological Assessment of High-Performance Runners, EN: Gore CJ, Ed, Physiological Tests for Elite Athletes, Australian Sports Commission, Human Kinetics, Champaign IL, pp 334–344, 2000.

Spencer MR, Gastin PB, Payne WR. Energy contribution in the 400 – 1500m events. *New Studies in Athletics* 1996;11:59-65.

Sproule J. Running economy deteriorates following 60 min of exercise at 80% VO_2 max. *Eur J Appl Physiol* 1989;77:366-371.

Spurrs RW, Murphy AJ, Watsford ML. The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur J Appl Physiol* 2003;89:1-7.

Stone MH, Wilson GD, Blessing D, Rozenek R. Cardiovascular responses to short-term olympic style weight-training in young men. *Can J Appl Sport Sci* 1983;8:134-139.

Tanaka H, Swensen T. Impact of resistance training on endurance performance. A new form of cross-training? *Sports Med* 1998;25:191-200.

Turner AM, Owings JM, Schwane JA. Six weeks of plyometric training (Plyom) improves running economy (Econ). *Med Sci Sports Exerc* 1999;31: Suppl abstract 1556.

Womack CJ, Flohr JA, Weltman A, Gaesser GA. The effects of short-term training program on the slow component of VO_2 . *J Strength and Cond Res* 2000;14:50-53

Wyndham CH, Strydom NB, van Rensburg AJ, Benade AJS (citado por Noakes *et al* 1990). Physiological requirements for world-class performances in endurance running. *South African Med J.* 1969;43:996-1002.

Xu F, Montgomery DL. Effect of prolonged exercise at 65 and 80% of VO_2 max on running economy. *Int J Sports Med* 1995;16:309-315.

Yuan Y, So R, Wong S, Chan KM. Ammonia threshold--comparison to lactate threshold, correlation to other physiological parameters and response to training. *Scand J Med Sci Sports* 2002;12:358-64.

1.3. – Predicción del rendimiento

Clásicamente los entrenadores han indicado fórmulas sencillas para comparar registros equivalentes, de una distancia a la siguiente, doblando el tiempo y añadiendo unos segundos de más. Así mismo diversos trabajos científicos han mostrado ese tipo de fórmulas. La figura 1.3.1 muestra algunas de ellas, más como ejemplo que como compendio. Esto no se ha hecho tanto con carácter predictivo como con el fin de evaluar si el perfil de corredor puede ser compatible con otra distancia superior o inferior a tenor del rendimiento en ambas.

Figura 1.3.1

Predicción del rendimiento en diversas distancias basado exclusivamente en la marca en otra distancia de competición (datos de Martin y Coe 1991)

Con la marca en 10000 Con la marca en 5000 Con la marca en 1500

Maratón= 4,76·X		
10000= X	10000= 2,1·X	
5000= 0,48·X	5000= X	5000= 3,63·X
3000= 0,28·X	3000= 0,58·X	3000= 2,15·X
1500=0,13·X	1500=0,27·X	1500= X
	800=0,13·X	800=0,48·X
	400=0,06·X	400=0,22·X

Existen muchos trabajos científicos que han estudiado la importancia relativa de estos factores en la predicción del rendimiento en carreras de fondo. Una conclusión general de todos ellos es que las mejores variables para predecir el rendimiento son, en efecto, las marcas en otras distancias de competición (Deason *et al* 1991, Noakes *et al* 1990, Farrell *et al* 1979, Slovic 1977). Pero incluso con datos científicos, esto no aporta soluciones al proceso de entrenamiento, por cuanto no revela explícitamente qué aspectos a nivel fisiológico requieren mayor mejora. El presente apartado identifica la importancia de cada uno de esos aspectos en relación a cada prueba desde el 800 hasta el maratón. Las figuras 1.3.4 a 1.3.9 muestran modelos de regresión múltiple que incluyen en algunos casos variables antropométricas y de entrenamiento previo a la competición. Hemos preferido centrarnos en ello y no en correlaciones de una sola variable debido a que además en corredores con perfiles distintos la predicción de marcas puede ser muy distinta de la realidad (Noakes 1988).

Dado que el grado y tipo de entrenamiento y el género pueden influir en las

predicciones, además del perfil fisiológico individual, esto se indica en los casos que se ha discriminado en el diseño de investigación. En todos los modelos de predicción hemos indicado el nivel de marcas de los/as atletas, de cara a poder aplicar preferiblemente unas u otras ecuaciones. En cada prueba se destacan las variables más a menudo destacadas en los estudios en general como de alta potencialidad predictora (tanto los trabajos de los modelos de regresión como otros). Para simplificar y filtrar la gran cantidad de datos publicados, tanto en estas figuras como en el texto en general se han seleccionado habitualmente modelos o correlaciones con $r > 0.8$.

Tal y como ya se indicó en el punto 1.2, las variables fisiológicas relacionadas con el rendimiento son, sintetizando, el VO_2max , el Umbral Anaeróbico, la Economía y las prestaciones Anaeróbicas (y sus velocidades relacionadas). Para realizar una exposición más clara, trataremos cada factor por separado.

VO_2max , Velocidad desarrollada a VO_2max , Velocidad Pico

La velocidad pico en un test progresivo es una variable que habitualmente se ha identificado como gran predictora del rendimiento (Scott y Houmard 1994, Houmard *et al* 1991, Noakes *et al* 1990, Scrimgeour *et al* 1986), así como la velocidad mínima que solicita ya VO_2max (Grant *et al* 1997, Yoshida *et al* 1993, Daniels y Daniels 1992, Morgan *et al* 1989). Ésta última, también llamada Velocidad Aeróbica Máxima (VAM, VMA, MAV según traducciones) o $V_{a_{máx}}$ (según autores), supone un referente muy interesante para establecer intensidades de entrenamiento relativas, ya sea en zonas de velocidad o junto a la frecuencia cardiaca (FC) (Morgan *et al* 1989). Su ventaja añadida es que no requiere de mediciones de lactato (Yoshida *et al* 1993), e incluso puede determinarse indirectamente, en caso de no poder medir VO_2 , como la velocidad media que se puede mantener en un test de 5 min (Berthon *et al* 1997a, Berthon *et al* 1997b, Chamoux *et al* 1996). Se ha indicado que éste sería un gran test para evaluar el VO_2max indirectamente y el rendimiento en varias pruebas (especialmente los 3000m)

(Berthon *et al* 1997a) aunque no hay fiabilidad sobre la estimación del valor del mismo en grupos heterogéneos de nivel y género (Berthon *et al* 1997a), a diferencia de otras pruebas de tiempo o distancia que sí estiman el valor de $VO_2\max$.

El valor de $VO_2\max$ (habitualmente en su expresión relativa $ml\cdot kg^{-1}\cdot min^{-1}$), se relaciona también con el rendimiento en carreras de fondo (Deason *et al* 1991, Fay *et al* 1989, Brandon y Boileau 1987, Cisar *et al* 1986).

Es preciso saber que los valores en tapiz y en campo resultan iguales (Meyer *et al* 2003), de cara a establecer limitaciones de las evaluaciones en laboratorio. Pero hay que recordar que parece que el $VO_2\max$ se estabiliza a los pocos años de entrenamiento. En definitiva, es sabido que para el alto rendimiento es preciso un elevado nivel de $VO_2\max$, pero a partir de ciertos valores elevados ya no influye tanto en el rendimiento como otras variables (Berg 2003, Kenney y Hodgson 1985).

Umbral Anaeróbico, velocidad desarrollada a umbral anaeróbico, % del umbral anaeróbico relativo al $VO_2\max$

El lector debe recordar que bajo esta terminología agrupamos ya en el punto 1.2. las diversas metodologías para establecer un segundo umbral fisiológico. Como ya indicamos, lógicamente el Máximo Estado Estable de Lactato parece el más adecuado (Billat 2003). En relación a su determinación, Beneke (2003) evaluó 14 métodos distintos para ello, seleccionando las 3 principales variables. Indicó así que se deberían usar cargas constantes de al menos 30 min donde el incremento de la concentración de lactato al final de la prueba, desde la medición realizada a los 10', no se exceda en más de $1mMol\cdot L^{-1}$.

Así, con sus diversas metodologías, este "Umbral Anaeróbico" aparece en los trabajos tanto en su expresión absoluta ($ml\cdot kg^{-1}\cdot min^{-1}$ o concentración de lactato) como relativa al $VO_2\max$ ($\%VO_2\max$), así como a la velocidad desarrollada en cada metodología. También la deflexión de la Frecuencia Cardíaca (FC) ha sido un método utilizado en diversas ocasiones, tanto en el protocolo original de Conconi y colaboradores (1980 y 1982) como en

variantes del mismo. Se ha visto que está muy relacionado con el VT2, pero que se sitúa por encima de éste en las variables de velocidad, FC y VO_2 entre un 7 y un 9% (Zacharogiannis y Farrally 1993). Así mismo que es comparable entre campo y laboratorio (Maffulli *et al* 1991), y que su velocidad asociada muestra altas correlaciones con el rendimiento desde los 3000 metros (Petit *et al* 1997, Maffulli *et al* 1991).

La velocidad de competición óptima en 10 kms sería la del umbral de deflexión de la FC multiplicada por 1,01 en bajo nivel o 1,03 en alto nivel (Petit *et al* 1997, Daniels y Gilbert 1979).

La velocidad del umbral anaeróbico se halló igual a la velocidad de competición en 10 kms para corredores/as con marcas entre 41 y 51 min, usando tanto los métodos de la D_{\max} como el de incremento de más de $1mMol\cdot L^{-1}$ entre cargas sucesivas en test progresivo escalonado (Nicholson y Sleivert 2001).

La velocidad de maratón se relaciona con las velocidades de carga constante en test de campo de 2,5 a 3 $mMol\cdot L^{-1}$ de lactato (corredores/as de 2h 30 min a 2h 50 min) (Föhrenbach *et al* 1987), y en todos los niveles (3 h 48 min a 2 h 17 min) con una velocidad ligeramente superior a la del OPLA, entre 3 y 7 metros/min más rápido (Farrell *et al* 1979). Ciertamente será una velocidad entre umbrales, y según el método se obtendrá más o menos relación con uno de ellos, pues otros vieron que el primer umbral de lactato no se relacionaba tanto con la marca en maratón como el segundo (muestra de 427 hombres y mujeres de nivel heterogéneo) y probablemente el nivel influya, por ello a mayor cantidad de la muestra de bajo nivel mayor peso tenga el primer umbral, y viceversa (Roecker *et al* 1998).

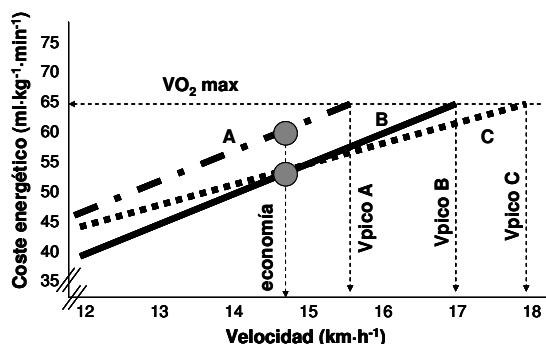
En los diversos modelos de predicción se pueden hallar las ecuaciones de éstos y otros trabajos. Es preciso indicar que en algunas de esas ecuaciones se ha usado el término "Umbral Anaeróbico", con las siglas "UAN", para simplificar, debido a que algunos autores utilizan términos comunes para referirse a metodologías distintas, aunque se hace referencia a ellas. Además hemos indicado la variable y unidad de medida concreta, lógicamente, para que ello no afecte al uso adecuado de estas ecuaciones.

Economía

La economía, por su parte, parece que no ha sido bien estudiada en la gran mayoría de trabajos, pues no parece discriminar el rendimiento de por sí, únicamente de forma combinada con otras variables en regresiones múltiples (Fay *et al* 1989). Bien es cierto que se muestra de forma implícita en la V_{pico} , pues tanto del VO_2max como de la economía deberían permitir que el corredor aguante más tiempo en esas pruebas incrementales, tanto por generar una gran potencia como por hacerlo de forma eficiente desarrollando así una mayor velocidad con una determinada energía (Daniels y Daniels 1992, Noakes *et al* 1990). Quizá por ello la velocidad pico permita predecir el rendimiento en un gran espectro de distancias en corredores entrenados, como observaron Scrimgeour y colaboradores (1986), desde los 10 a los 90 kms, y otros observaron también en los 1500 y 3000 metros (Slattery *et al* 2006, Roecker *et al* 1998, Yoshida *et al* 1993, Noakes *et al* 1990, Noakes *et al* 1988, Cisar *et al* 1986).

La figura 1.3.2 ilustra, con ejemplos posibles, esta importancia relativa del valor de VO_2max frente a economías de carrera muy diversas. Concretamente, puede observarse cómo a igual VO_2max cada sujeto ("A", "B" o "C") alcanza una V_{pico} o VAM distinta, fruto de sus diferencias en la tendencia general del coste energético.

Figura 1.3.2
Importancia de la VAM o V_{pico} como ejemplo de interacción entre economía y VO_2max (modificado de Noakes 2002)



Clásicamente se ha indicado que la economía debía medirse a velocidades bajas, como por ejemplo serían las

indicadas en la figura 1.3.2, o inferiores (pues para el corredor "A" ya sería muy elevada). Esto permite observar fácilmente un coste energético estable. Pero Daniels y Daniels, en 1992, en un magnífico trabajo, remarcaban que la economía también debería valorarse a altas velocidades, tales como la de competición, y por encima de ella, incluso cerca de VO_2max . Medirla al 100% no sería adecuado por estar el VO_2 declinando hacia meseta, y aparecería el/la atleta con gran economía en esa velocidad, por lo que indicaron que lo ideal sería medir la economía al 95% de VO_2max . El inconveniente con las altas velocidades es la dificultad para lograr un consumo estable debido al componente lento.

Otra opción sería medir la economía siempre a velocidades cercanas a la competición, preferiblemente en distancias superiores a los 1500 (para que sean velocidades iguales o inferiores a la VAM), quizá con largas duraciones o distancias de esfuerzo (1/4 – 2/3 de la prueba), pese a incurrir en dicho componente lento, que en cualquier caso ocurrirá en mayor medida en competición.

Tanto por aspectos morfológicos como metabólicos, como de hábitos de entrenamiento, los fondistas deberían ser más económicos que los mediofondistas. Pero no siempre se ha hallado así a bajas velocidades (Daniels y Daniels 1992). Puede que los mediofondistas puedan parecer más económicos que los fondistas, por mayor tendencia inicial al sistema de potencia glucolítica que junto con el mayor peso puedan mostrar en duraciones cortas de esfuerzo un menor VO_2 .

En resumen, parece que para evaluar la economía se deberían seleccionar velocidades competitivas o elevadas, y debería tenerse muy en cuenta el efecto de la duración del esfuerzo.

Es lógico que las variables antropométricas y de composición corporal tengan relación con el rendimiento, dado que tiene que ver claramente con un menor coste energético en una actividad como es la carrera a pie, donde debe transportarse el peso corporal con movimientos oscilantes de los segmentos en cadena abierta. Las variables que han demostrado ciertas relaciones con el rendimiento (pero de menor correlación por lo general que las variables de

esfuerzo) han sido la mayor ectomorfia, el menor % graso, el menor Índice de Masa Corporal, el peso y el peso libre de grasa (Berg *et al* 1998, Housh *et al* 1986, Bale *et al* 1985)

Como aparente hecho anecdótico, pero de notable importancia, Saltin (2003) halló una modesta ($r^2=0,6$) relación directa entre el menor perímetro de la pierna (no el muslo, sino por debajo de la rodilla) y el menor gasto energético relativo (VO_2 , expresado en $ml/kg^{0,75}/min$) pudiéndose estimar el rendimiento de forma indirecta. Biomecánicamente, una pierna más fina y menos pesada es más fácil de mover y controlar en la acción de péndulo de la carrera, que se traduciría en un ahorro energético (Myers y Steudel 1985).

Así, la economía no solo se ha de entender como un menor gasto a cualquier intensidad, pues de esa forma parecería, que solo importa en las pruebas de fondo, como en ocasiones se ha dicho (Deason *et al* 1991). La economía también puede permitir que con un mismo gasto se logre un mayor rendimiento, concretamente, avanzar más en cada paso, y con ello desarrollar una mayor velocidad. Por ello en este caso se relaciona con los aspectos musculares, y con ello es importante también en los corredores de mediofondo para no solo lograr desarrollar una zancada más potente sino, sobretodo, mantener dicha potencia con la aparición de la fatiga. Con ello hacemos referencia también a la capacidad anaeróbica, pues la economía mide un coste de VO_2 .

Capacidad anaeróbica, potencia muscular

Sabido es que la habilidad para aclarar lactato e hidrogeniones puede prevenir el inicio de la fatiga (Juel 1996). Bret y col (2003) hallaron que los medifondistas de 800 y 1500 metros tenían mejor capacidad para el intercambio de lactato que los sprinters de 100 y 400 metros, parece que por adaptaciones metabólicas relacionadas con hábitos de entrenamiento. Parece que los mejores corredores de 800 son los que mejor intercambio logran. Sin embargo, hallaron similar habilidad para la remoción en todos (100 a 1500m), puede que porque unos lo remuevan por neoglucogénesis en las fibras rápidas y otros por oxidación. Esto sugiere que no es una habilidad que

influya en el rendimiento en estas especialidades. Ciertamente es que la amplia recuperación entre competiciones (mínimo 1 día habitualmente en la alta competición) puede hacer que eso sea así, mientras que por el contrario, en otros deportes como los de lucha o de equipo, esta habilidad pueda ser crucial.

Ramsbottom y colaboradores (1994) hallaron cierta relación entre el Déficit Acumulado de Oxígeno (AOD) y la marca en 800 en un grupo de hombres de nivel heterogéneo, algo que no hallaron Olesen et al en dos grupos con niveles distintos de corredores (1994), del mismo modo que Craig y Morgan (1998). Quizá la causa sea que en muestras pequeñas y homogéneas el AOD no discrimine el rendimiento.

Aunque hayan indicado que el déficit pico de oxígeno o el Máximo AOD sean de las mejores variables para medir la capacidad anaeróbica, Weyand y colaboradores (1994) hallaron solo una modesta relación del mismo con el rendimiento en 800, 1500 y 5000.

Deason y colaboradores (1991) hallaron un modelo de regresión múltiple para la marca en 800 a partir de las marcas en tests de 100 y 300m, claramente anaeróbicos.

Posiblemente, aunque la contribución anaeróbica sea crucial, debido a los datos sobre su participación relativa, donde vemos que ya desde el 800 la contribución total anaeróbica no es predominante (Spencer y Gustin 2001, Spencer *et al* 1996), es lógico que apenas puedan aplicarse ecuaciones para predecir el rendimiento a partir de aspectos neuromusculares de forma independiente, y que sean necesarias variables tanto de potencia aeróbica como anaeróbica.

El trabajo de Housh y colaboradores (1988) con corredores de 800 a 3000m ejemplifica esta cuestión, aunque fuera con corredores de bajo nivel. Midiendo variables tanto aeróbicas como anaeróbicas y de fuerza y composición corporal, no hallaron que ninguna variable de forma independiente tuviera correlación. Sin embargo, sí la tuvieron en una regresión múltiple todas las principales que se han ido indicando.

Otro grupo muy activo al respecto de estos temas ha sido el de los finlandeses Paavolainen, Nummela y Rusko (y colaboradores), evaluando habilidades neuromusculares como el salto o el sprint así como un test anaeróbico ("MART") y relacionando estas variables con la carrera

de 5000 metros (Nummela *et al* 2006, Paavolainen *et al* 1999).

El test MART consiste en 10 repeticiones de 150m o 20 s (según sea pista o tapiz) a velocidad creciente hasta la máxima posible y pausas de 100 segundos (Nummela *et al* 2006, Paavolainen *et al* 2000, Paavolainen *et al* 1999). Tanto su aplicación en pista como en tapiz para equivalente en cuanto a poder predecir el rendimiento (Nummela *et al* 2007). La figura 1.3.7 detalla los cálculos que se derivan de ello y una regresión múltiple para estimar el ritmo de 5000.

Predicción a largo plazo

Otro concepto interesante es el de predecir el margen de mejora en el rendimiento conforme pasen los años. Péronnet y colaboradores proponen en su libro de 2001 una serie de "hipótesis" más o menos optimistas o restrictivas, partir de las siguientes variables de la figura 1.3.9. Esta primera parte del proceso predictivo propuesto tiene como puede observarse una parte subjetiva importante, si bien a partir de ello los autores aplican cálculos del "techo" de mejora en los factores determinantes del rendimiento, y a partir de ahí de las marcas a las que puede aspirar el/a atleta.

Figura 1.3.3

Resumen del proceso de predicción de los límites máximos de mejora del rendimiento de un/a corredor/a

(resumen adaptado de la propuesta de Péronnet *et al* 2001)

Ítems a contestar con "alto"/"medio"/"bajo":

- nivel de marcas en la primera temporada sistemática de entrenamiento
- entrenabilidad según la evolución de las marcas con los años de entrenamiento
- experiencia previa
- carga total de entrenamientos hasta ahora
- esfuerzos dispuestos a realizar

Hipótesis de mejora a aplicar: "Muy Alta", "Alta", "Media", "Baja", "Muy Baja"

Como conclusión, los factores que determinan el rendimiento son independientes, pero interaccionan entre sí (Brandon 1995). Esta visión global debe tenerse en cuenta de cara a las predicciones del rendimiento. Las figuras 1.3.4 a 1.3.9 permiten calcular las

posibilidades de marca del/a atleta a partir de datos de evaluaciones, asumiendo un adecuado planteamiento para la competición en lo psicológico y lo táctico, y condiciones ambientales favorables.

Figura 1.3.4

Predicción del rendimiento en los 800m a partir de evaluaciones de rendimiento, antropométricas, o de entrenamiento previo

Leyenda para discriminar el nivel de marcas de las muestras de cada estudio: ****: elite (criterio: <1:50), ***: alto-medio nivel (>1:50-<2:10), **: medio-bajo (>2:10-<2:30), *: muy bajo (>2:30) (referencias para hombres, mismo rango una categoría por encima en mujeres hasta 3:00)

800 (tiempo en s) = $-0,24 \cdot \text{Pico Déficit O}_2 \text{ (mL} \cdot \text{kg}^{-1}) - 0,61 \cdot \text{VO}_2 \text{ max (mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) + 0,30 \cdot \text{UAN (\%VO}_2 \text{ pico) + 0,08} \cdot \text{economía (mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \text{ a } 3,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) + 20,63 \cdot \text{género (M=1; F=2) + 7,68} \cdot \text{especialidad (Sprinter=1; Fondista=2) + 115,2 (Weyand et al 1994) ***}$

800 (tiempo en s) = $38,791 + 4,444 \cdot \text{Marca } 300\text{m (s)} - 7,485 \cdot \text{Marca } 100\text{m (s)} \text{ (Deason et al 1991) **}$

800 (velocidad en m·s⁻¹) = $4,5317 + 0,24630 \cdot \text{UAN (v (m/s) en umbral deflexión FC) (Maffulli et al 1991) **}$

800 (velocidad en m·s⁻¹) = $5,47 + 0,32 \cdot \text{VO}_2 \text{ max (mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) + 0,21 \cdot \text{Cap Anaeróbica (kg} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 2\text{min}^{-1}) + 0,37 \cdot \text{Pot anaeróbica (kg} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) + 0,32 \cdot \text{Índice Ponderal} + 0,19 \cdot \text{% graso} + 0,39 \cdot \text{velocidad máxima sprint (m} \cdot \text{s}^{-1}) \text{ (Brandon y Boileau 1987) **}$

Variables más destacadas:

- **VO₂ max** (Brandon y Boileau 1987)
- **Capacidad Anaeróbica** (Deason *et al* 1991, Brandon y Boileau 1987)
- **Antropometría** (Deason *et al* 1991, Brandon y Boileau 1987)

Figura 1.3.5

Predicción del rendimiento en los 1500m a partir de evaluaciones de rendimiento, antropométricas, o de entrenamiento previo

Leyenda para discriminar el nivel de marcas de las muestras de cada estudio: ****: elite (criterio: <3:45), ***: alto-medio nivel (>3:45-<4:15), **: medio-bajo (>4:15-<5:30), *: muy bajo (>5:30) (referencias para hombres, mismo rango una categoría por encima en mujeres hasta 6:30)

1500 (tiempo en s) = $-0,51 \cdot \text{Pico Déficit O}_2 \text{ (mL} \cdot \text{kg}^{-1}) - 2,99 \cdot \text{VO}_2 \text{ max (mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) + 0,13 \cdot \text{UAN (\%VO}_2 \text{ pico) + 1,19} \cdot \text{economía (mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \text{ a } 3,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) + 25,4 \cdot \text{género (M=1; F=2) + 11,2} \cdot \text{especialidad (Sprinter=1; Fondista=2) + 382,1 (Weyand et al 1994) ***}$

1500 (velocidad en m·s⁻¹) = $3,124 + 0,618 \cdot (\text{VPico tapiz (km} \cdot \text{h}^{-1}) + 0,024 \cdot (\text{kilometraje/semana}) - 0,023 \cdot \text{edad (años)} + 0,022 \cdot \text{FC en IAT (ppm)} + 0,034 \cdot \text{peso corporal} - 0,105 \cdot \text{LA máx test progresivo tapiz (mMol} \cdot \text{L}^{-1}) - 0,002 \cdot \text{estatura (cm)} \text{ (Roecker et al 1998) ***}$

1500 (velocidad en m·s⁻¹) = $1,5786 + 1,1546 \cdot \text{UAN (v (m} \cdot \text{s}^{-1}) \text{ en umbral deflexión FC) (Maffulli et al 1991) **}$

1500 (velocidad en m·s⁻¹) = $10,27 + 0,63 \cdot (\text{VO}_2 \text{ max (mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) + 0,21 \cdot \text{Cap Anaeróbica (kg} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 2\text{min}^{-1}) + 0,30 \cdot \text{Pot anaeróbica (kg} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) + 0,17 \cdot \text{longitud muslo (cm)} + 0,29 \cdot \text{velocidad máxima sprint (m} \cdot \text{s}^{-1}) \text{ (Brandon y Boileau 1987) **}$

Variables más destacadas:

- **Vpico** (Roecker *et al* 1998)
- **VO₂ max** (Padilla *et al* 1992, Brandon y Boileau 1987)
- **VUAN** (deflexión FC) (Maffulli *et al* 1991), umbral ventilatorio (Iwaoka *et al* 1988)
- **Capacidad Anaeróbica** (Brandon y Boileau 1987)
- **Antropometría** (Roecker *et al* 1998, Brandon y Boileau 1987)

Figura 1.3.6

Predicción del rendimiento en los 3000m y pruebas afines, a partir de evaluaciones de rendimiento, antropométricas, o de entrenamiento previo

Leyenda para discriminar el nivel de marcas de las muestras de cada estudio: ****: elite (criterio: <8:20), ***: alto-medio nivel (>8:20-<9:30), **: medio-bajo (>9:30-<12:00), *: muy bajo (>12:00) (referencias para hombres, mismo rango una categoría por encima en mujeres hasta 15:00)

3000m (tiempo en s) = $-13,64 \cdot \text{Vpico test progresivo (km}\cdot\text{h}^{-1}) - 25,61 \cdot \text{vUAN (por lactato, en km}\cdot\text{h}^{-1}) - 5,40 \cdot \text{LA pico (mMol}\cdot\text{L}^{-1}) + 1358,5$ (Slattery *et al* 2006) **

3000m (tiempo en s) = $1062,78 - 28,165 \cdot \text{vUAN (VT2, en km}\cdot\text{h}^{-1})$ (Zacharogiannis y Farrally 1993) **

3000m (velocidad en m·s⁻¹) = $0,4223 \cdot \text{vUAN (por OBLA, en m}\cdot\text{s}^{-1}) + 0,01333 \cdot \text{VO}_2 \text{ en 1er umbral láctico (ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}) + 0,2319 \cdot \text{v 1er umbral láctico (m}\cdot\text{s}^{-1}) + 1,5746$ (Yoshida *et al* 1993) **

3000m (velocidad en km·h⁻¹) = $6,35 \cdot 0,802 \cdot \text{vUAN (por OBLA, en km}\cdot\text{h}^{-1})$ (Grant *et al* 1997) **

3000m (velocidad en km·h⁻¹) = $6,05 + 0,767 \cdot \text{v4mMol/L (km}\cdot\text{h}^{-1})$ (Grant *et al* 1997) **

3000m (velocidad en km·h⁻¹) = $6,44 + 0,614 \cdot \text{vVO}_2\text{max (km}\cdot\text{h}^{-1})$ (Grant *et al* 1997) **

2millas (tiempo en min) = $23,09044 - 0,15337 \cdot \text{VO}_2\text{max (ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}) - 0,04524 \cdot \text{UAN (VT2, en ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$ (Cisar *et al* 1986) *

2millas (tiempo en min) = $-1,995 \cdot \text{VO}_2\text{max (L}\cdot\text{min}^{-1}) + 2,09 \cdot \text{economía a 11,2 km}\cdot\text{h}^{-1} \text{ (L}\cdot\text{min}^{-1}) + 0,078 \cdot \text{peso libre grasa - 1,181} \cdot \text{UAN (ventilatorio, en L}\cdot\text{min}^{-1}) + 12,976$ (Housh *et al* 1988) **

2millas (tiempo en min) = $0,19947 \cdot \text{%graso} + 18,38874 \cdot \text{(peso libre de grasa/altura) + 3,09269}$ (Housh *et al* 1986) **

3000 obstáculos (tiempo en s) = $93,4 + 5,9 \cdot \text{peso corporal}$ (Keeney y Hodgson 1985) ****

3000 obstáculos (tiempo en s) = $99 + 5,4 \cdot \text{peso corporal} + 0,6 \cdot \text{UAN (VT2, en ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$ (Keeney y Hodgson 1985) ****

Variables más destacadas:

- **Vpico** (Slattery *et al* 2006, Roecker *et al* 1998, Noakes *et al* 1990, Noakes *et al* 1988)
- **VAM** (Yshida *et al* 1993)
- **VO₂ max** (Padilla *et al* 1992, Deason *et al* 1991, Housh *et al* 1988, Brandon y Boileau 1987, Cisar *et al* 1986, Hagan *et al* 1981, Farrell *et al* 1979)
- **VUAN** (deflexión FC) (Grant *et al* 1997, Yshida *et al* 1993, Zacharogiannis *et al* 1993); (métodos con lactato) (Slattery *et al* 2006, Yshida *et al* 1993, Farrell *et al* 1979)
- **UAN** (ml/kg/min) (Cisar *et al* 1986), (L/min) (Housh *et al* 1988), y UAN (%VO₂ max) (Noakes *et al* 1990)
- **Capacidad Anaeróbica** (Mahon *et al* 1996)
- **Economía** (Mahon *et al* 1996, Noakes *et al* 1990, Housh *et al* 1988)
- **Antropometría** (Housh *et al* 1988, Housh *et al* 1986, Sparling y Cureton 1983, Hagan *et al* 1981)

Figura 1.3.7

Predicción del rendimiento en los 5000m a partir de evaluaciones de rendimiento, antropométricas, o de entrenamiento previo

Leyenda para discriminar el nivel de marcas de las muestras de cada estudio: ****: elite (criterio: <14:30), ***: alto-medio nivel (>14:30-<16:30), **: medio-bajo (>16:30-<23:30), *: muy bajo (>23:30) (referencias para hombres, mismo rango una categoría por encima en mujeres hasta 26:45)

5000 (tiempo en s) = $1155 - 5,4 \cdot \text{edad} - 2,9 \cdot \text{UAN (VT2, en ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$ (Keeney y Hodgson 1985) ****

5000 (tiempo en s) = $0,38 \cdot \text{Pico Déficit O}_2 \text{ (ml}\cdot\text{kg}^{-1}) - 14,29 \cdot \text{VO}_2\text{max (ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}) + 1,25 \cdot \text{UAN (%VO}_2\text{ pico) + 4,42} \cdot \text{economía (ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1} \text{ a } 3,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}) + 55,9 \cdot \text{género (M=1; F=2)} - 47,4 \cdot \text{especialidad (Sprinter=1; Fondista=2)} + 1664,9$ (Weyand *et al* 1994) ***

5000 (velocidad en m·s⁻¹) = $0,066 \cdot \text{VO}_2\text{max (ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}) + 0,048 \cdot \text{"MART VO}_2\text{ ganancia"} - 0,549$ (Nummela *et al* 2006) ** (MART= Maximal Anaerobic Running Test, 10x150m con 100s de pausa siendo la primera repetición a 4,75 m·s⁻¹ e incrementando hasta la 9ª 0,41 m·s⁻¹. La última al máximo (M10). Se calcula la demanda de VO₂ de esa última en ml·kg⁻¹·min⁻¹ tal que: Demanda de VO₂ en MART= $0,205 \cdot \text{vM10 (m}\cdot\text{min}^{-1}) + 0,109 \cdot (\text{vM10 (m}\cdot\text{min}^{-1})/60)^2 - 6,1$. Entonces se calcula la habilidad del corredor para producir potencia por encima de VO₂max tal que: Ganancia de VO₂ en MART (ml·kg⁻¹·min⁻¹) = Demanda de VO₂ en MART (ml·kg⁻¹·min⁻¹) - VO₂max (ml·kg⁻¹·min⁻¹).

5000 (velocidad en m·s⁻¹) = $4,436 + 0,045 \cdot \text{UAN (VO}_2 \text{ en UAN láctico (m}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})) - 0,033 \cdot \text{edad} + 0,005 \cdot \text{min duración media de sesión}$ (Takeshima y Tanaka 1995) **

5000 (velocidad en m·s⁻¹) = $3,404 + 0,683 \cdot \text{VPico tapiz (km}\cdot\text{h}^{-1}) + 0,274 \cdot \text{UAN (m}\cdot\text{s}^{-1} \text{ en IAT)} - 0,050 \cdot \text{%graso} - 0,006 \cdot \text{FCmáx} - 0,079 \cdot \text{LA máx test progresivo tapiz (mMol}\cdot\text{L}^{-1})$ (Roecker *et al* 1998) **

5000 (velocidad en m·min⁻¹) = $0,346 \cdot \text{vLA 4 mMol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ (m}\cdot\text{min}^{-1}) + 1,899 \cdot \text{VO}_2\text{max (m}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}) + 56,003$ (Fay *et al* 1989) **

Variables más destacadas:

- **Vpico** (Roecker *et al* 1998, Scott *et al* 1994)
- **VO₂max** (Fay *et al* 1989)
- **VUAN** (deflexión FC) (Fay *et al* 1989), umbral ventilatorio (Iwaoka *et al* 1988) y métodos con lactato (Roecker *et al* 1998, Fay *et al* 1989)
- **Antropometría** (Roecker *et al* 1998)

Figura 1.3.8

Predicción del rendimiento en los 10000m a partir de evaluaciones de rendimiento, antropométricas, o de entrenamiento previo

Leyenda para discriminar el nivel de marcas de las muestras de cada estudio: ****: elite (criterio: <31:00), ***: alto-medio nivel (>31:00-<35:00), **: medio-bajo (>35:00-<50:00), *: muy bajo (>50:00) (referencias para hombres, mismo rango una categoría por encima en mujeres hasta 56:00)

10km (tiempo en min) = $-0,91*(\text{sesiones/semana}) - 0,11*(\text{millas/semana}) + 46,32$ (Bale *et al* 1986) (mezcla de niveles **** a **)

10km (tiempo en min) = $-0,68*(\text{sesiones/semana}) - 0,11*(\text{millas/semana}) - 0,38*(\text{años entrenamiento}) + 46,45$ (Bale *et al* 1986) (mezcla de niveles **** a **)

10km (tiempo en min) = $-0,68*(\text{sesiones/semana}) - 0,10*(\text{millas/semana}) - 0,38*(\text{años entrenamiento}) - 0,68*(\text{ectomorfia}) + 47,93$ (Bale *et al* 1986) (mezcla de niveles **** a **)

10km (tiempo en min) = mujeres: $37 + 3,3*(\text{endomorfa})$; hombres: $4,12*IMC - 4,5*(\text{mesomorfa}) - 29,1$ (Berg *et al* 1998) *

10km (velocidad en m/s) = $4,371 + 0,037*UAN$ (VO_2 en UAN láctico ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)) - $0,031*(\text{edad}) + 0,005*(\text{duración media de sesión (min)})$ (Takeshima y Tanaka 1995) **

10km (velocidad en m/s) = $3,652 + 0,389*UAN$ ($m \cdot s^{-1}$ en IAT) + $0,522*V_{pico}$ test progresivo ($km \cdot h^{-1}$) + $0,013*(\text{kilometraje/semana}) - 0,001*(FC \text{ IAT}) - 0,026*(\text{peso corporal}) - 0,051*LA$ máx test progresivo tapiz ($mMol \cdot L^{-1}$) (Roecker *et al* 1998) **

10km (velocidad en m/s) = $127,39 + 0,64*VO_{2max}$ ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) + $0,21*Cap \text{ Anaeróbica}$ ($kg \cdot m \cdot kg^{-1} \cdot 2min^{-1}$) + $0,40*(\text{estatura (cm)})$ (Brandon y Boileau 1987) **

10km (velocidad en $km \cdot h^{-1}$) = $1,03*V$ Umbral deflexión FC ($km \cdot h^{-1}$) (Petit *et al* 1997, Daniels y Gilbert 1979) ***

10km (velocidad en $km \cdot h^{-1}$) = $1,01$ o $1,02*V$ Umbral deflexión FC ($km \cdot h^{-1}$) (Petit *et al* 1997) *

10km (velocidad en $m \cdot min^{-1}$) = $0,437* vLA 4$ $mMol \cdot L^{-1}$ ($m \cdot min^{-1}$) + $2,082 VO_2 \text{ max}$ ($mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) + $8,698$ (Fay *et al* 1989) **

10km (velocidad en $m \cdot min^{-1}$) = $0,728* vLA 4$ $mMol \cdot L^{-1}$ ($m \cdot min^{-1}$) + $57,926$ (Fay *et al* 1989) **

10km (velocidad en $m \cdot min^{-1}$) = $0,407* vLA 2$ $mMol \cdot L^{-1}$ ($m \cdot min^{-1}$) + $2,276 VO_2 \text{ max}$ ($mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) + $12,706$ (Fay *et al* 1989) **

6millas (tiempo en min) = $81,99559 - 0,59925* VO_{2max}$ ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) - $0,14900*UAN$ (ventilatorio, en $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) (Cisar *et al* 1986) **

Variables más destacadas:

- **Vpico** (Roecker *et al* 1998, Morgan *et al* 1989, Scrimgeour *et al* 1986)
- **VAM** (Morgan *et al* 1989)
- **VO₂ max** (Houmard *et al* 1991, Morgan *et al* 1989, Brandon y Boileau 1987, Cisar *et al* 1986, Farrell *et al* 1979)
- **VUAN** (deflexión FC) (Petit *et al* 1997, Daniels y Gilbert 1977) umbral ventilatorio (Iwaoka *et al* 1988) y métodos con lactato (Nicholson y Sleivert 2001, Roecker *et al* 1998, Evans *et al* 1995, Morgan *et al* 1989, Farrell *et al* 1979)
- **Antropometría** (Berg 1998, Brandon y Boileau 1987, Bale *et al* 1986)

Figura 1.3.9

Predicción del rendimiento en maratón a partir de evaluaciones de rendimiento, antropométricas, o de entrenamiento previo

Leyenda para discriminar el nivel de marcas de las muestras de cada estudio: ****: elite (criterio: <2:24), ***: alto-medio nivel (>2:24-<3:00), **: medio-bajo (>3:00-<4:00), *: muy bajo (>4:00) (referencias para hombres, mismo rango una categoría por encima en mujeres hasta 4:30)

Maratón (tiempo en min) = $1,98*Marca$ en 1/2 maratón (min) + $6,23*UAN$ (Lactato en $mMol \cdot L^{-1}$) - $0,46*UAN$ (%Vpico en UAN por lactato) + $33,84$ (Noakes *et al* 1990) ***

Maratón (tiempo en min) = $1,94*Marca$ en 1/2 maratón (min) + $5,8*UAN$ (Lactato en $mMol \cdot L^{-1}$) - $0,44*UAN$ (%Vpico en UAN por lactato) + $0,39*economía$ (VO_2 a $16 km \cdot h^{-1}$) + $16,79$ (Noakes *et al* 1990) ***

Maratón (tiempo en min) = $1,29*UAN$ (%Vpico en UAN por lactato) - $10,86*vUAN$ (por lactato, en $km \cdot h^{-1}$) + $241,3$ (Noakes *et al* 1990) ***

Maratón (tiempo en min) = $-4,92*vUAN$ (por lactato, en $km \cdot h^{-1}$) - $4,46*V_{pico}$ ($km \cdot h^{-1}$) + $337,8$ (Noakes *et al* 1990) ***

Maratón (tiempo en min) = $-4,42*(\text{sesiones/semana}) + 218,5$ (Bale *et al* 1985) niveles *** y **

Maratón (tiempo en min) = $-3,72*(\text{sesiones/semana}) - 7,02*(\text{ectomorfia}) + 242,6$ (Bale *et al* 1985) niveles *** y **

Maratón (tiempo en min) = $-3,32*(\text{sesiones/semana}) - 6,05*(\text{ectomorfia}) - 0,85*(\text{años entrenamiento}) + 240,6$ (Bale *et al* 1985) niveles *** y **

Maratón(velocidad media en m/s) = $0,038*UAN$ (VO_2 en UAN láctico ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)) - $0,031*(\text{edad}) + 0,005*(\text{duración media de sesión (min)}) + 3,707$ (Takeshima y Tanaka 1995) **

Maratón (velocidad media en m/s) = $0,546*vUAN$ ($m \cdot s^{-1}$ en IAT) + $0,293*V_{pico}$ test progresivo ($km \cdot h^{-1}$) + $0,013*(\text{kilometraje/semana}) - 0,0155*FC$ máxima - $0,0253*peso$ corporal + $3,4$ (Roecker *et al* 1998) **

Maratón (tiempo en min) = $0,45*(\text{marca personal en 1 milla (min)}) - 7,9*(\text{haber terminado 1 maratón antes (SI=1 ; NO=0)}) - 0,08*(\text{millas en total últimas 8 semanas}) - 1,45*(\text{entrenamiento más largo en la últimas 8 semanas (min)}) + 116,5$ (Slovic *et al* 1977)

Maratón (tiempo en min) = $6,62*(\text{marca personal en 5 millas (min)}) - 0,05*(\text{millas en total últimas 8 semanas}) - 1,45*(\text{entrenamiento más largo en la últimas 8 semanas (min)}) + 42,8$ (Slovic *et al* 1977)

Maratón (tiempo en min) = $2,98*(\text{marca personal en 10 millas (min)}) - 0,04*(\text{millas en total últimas 8 semanas}) - 1,30*(\text{entrenamiento más largo en la últimas 8 semanas (min)}) + 46,6$ (Slovic *et al* 1977)

Maratón (tiempo en min) = $3,45*VO_{2max}$ ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) + $387,3$ (Foster y Daniels 1975)

Maratón (tiempo en min) = $-2,75*VO_{2max}$ ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) - $0,022*millas$ en total últimas 8 semanas - $1,0*(\text{entrenamiento más largo en la últimas 8 semanas (millas)}) + 0,146*(\text{ritmo (segundos/milla) en entrenamientos a ritmo de 3-10 millas}) + 319,4$ (Foster y Daniels 1975)

Maratón (tiempo en min) = $-2,028*VO_{2max}$ ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) - $1,818*UAN$ (% $VO_2 \text{ max}$) + $446,7$ (Davis y Thompson 1979)

Maratón (tiempo) = $-2,17* VO_{2max}$ ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) - $4,97*(\text{días de entrenamiento en últimas 9 semanas}) + 1,26*(\text{total entrenamientos en últimas 9 semanas}) - 0,41*(\text{ritmo medio en entrenamiento (m/min)}) + 610,9$ (Hagan *et al* 1981) **

Maratón (tiempo) = $-0,17*(\text{kms totales 9 últimas semanas}) - 2,01*VO_{2max}$ ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) - $1,24*(\text{edad}) - 0,45*(\text{ritmo medio en entrenamiento (m/min)}) + 7,09*(\text{kms promedio por sesión últimas 9 semanas}) + 525,9$ (Hagan *et al* 1981) **

Fig 1.3.9 (continuación)

Maratón (tiempo)= $-0,389 + 1,046 \cdot v_{LA} \text{ 4 mMol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})$
(Förenbach *et al* 1987) ***

Maratón (tiempo)= $-0,456 + 1,09 \cdot v_{LA} \text{ 3 mMol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})$
(Förenbach *et al* 1987) ***

Maratón (tiempo)= $-0,375 + 1,09 \cdot v_{LA} \text{ 2,5 mMol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})$
(Förenbach *et al* 1987) ***

Maratón (Lactato promedio)=
Marca 2h 20min: $3,0 - 2,5 \text{ mMol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Förenbach *et al* 1987) ****
Marca 2h 45min: $2,5 - 2,0 \text{ mMol}\cdot\text{L}^{-1}$ (O'Brien *et al* 1993) ***
Marca 3h 30min: $1,5 - 1,0 \text{ mMol}\cdot\text{L}^{-1}$ (O'Brien *et al* 1993) **

Variables más destacadas:

- **Vpico** (Roecker *et al* 1998, Scrimgeour *et al* 1986)
- **VO₂ max** (Farrell *et al* 1979, Foster y Daniels 1975)
- **VUAN** (métodos con lactato) (Roecker *et al* 1998, Farrell *et al* 1979)
- **Antropometría** (Bale *et al* 1985)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ESTE APARTADO:

Bale P, Bradbury D, Colley E. Anthropometric and training variables related to 10km running performance. *Br J Sports Med* 1986;20:170-173.

Bale P, Rowell S, Colley E. Anthropometric and training characteristics of female marathon runners as determinants of distance running performance. *J Sports Sci* 1985;3:115-126.

Beneke R. Methodological aspects of maximal lactate steady state-implications for performance testing. *Eur J Appl Physiol* 2003;89:95-99.

Berg K. Endurance training and performance in runners. Research limitations and unanswered questions. *Sports Med* 2003;33:50-73.

Berg K, Latin RW, Coffey C. Relationship of somatotype and physical characteristics to distance running performance in middle age runners. *J Sports Med Phys Fitness* 1998;38:253-257.

Berthon P, Fellmann N, Bedu M, Beaune B, Dabonneville M, Coudert J, Chamoux A. A 5-min running field test as a measurement of maximal aerobic velocity. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1997a;75:233-238.

Berthon P, Dabonneville M, Fellmann N, Bedu M, Chamoux A. Maximal aerobic velocity measured by the 5-min running field test on two different fitness level groups. *Arch Physiol Biochem* 1997b;105:633-639.

Billat V. Fisiología y Metodología del Entrenamiento. Paidotribo, Barcelona 2002.

Brandon LJ, Boileau RA. The contribution of selected variables to middle and long distance run performance. *J Sports Med Phys Fitness* 1987;27:157-164.

Brandon LJ, Physiological factors associated to middle distance running performance. *Sports Med* 1995;19:268-277.

Bret C, Messonnier L, Nouck Nouck JM, Freund H, Dufour AB, Lacour JR. Differences in lactate exchange and removal abilities in athletes specialised in different track running events (100 to 1500 m). *Int J Sports Med* 2003;24:108-113.

Chamoux A, Berthon P, Laubignat JF. Determination of maximum aerobic velocity by a five minute test with reference to running world records. A theoretical approach. *Arch Physiol Biochem* 1996;104:207-211.

Cisar CJ, Thorland WG, Johnson GO, Housh TJ. The effect of endurance training on metabolic responses and the prediction of distance running performance. *J Sports Med Phys Fitness* 1986;26:234-240.

Conconi F, Ferrari M, Ziglio PG, Droghetti P, Codeca L. Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners. *J Appl Physiol* 1982;52:869-873.

Conconi F, Ferrari M, Ziglio PG, Droghetti P, Codeca L. [Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in man](italiano) *Boll Soc Ital Biol Sper* 1980;56:2504-2510.

Craig IS, Morgan DW. Relationship between 800-m running performance and accumulated oxygen deficit in middle-distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:1631-1636.

- Daniels J, Daniels N. Running economy of elite male and elite female runners. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:483-489.
- Daniels JT, Gilbert J. Oxygen Power: Performance tables for distance runners. Oxygen Power, Tempe AZ, 1979(citado por Petit et al 1997)
- Davies CT, Thompson MW. Aerobic performance of female marathon and male ultramarathon athletes. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1979;41:233-245.
- Deason J, Powers SK, Lawler J, Ayers D, Stuart MK. Physiological correlates to 800 meter running performance. *J Sports Med Phys Fitness* 1991;31:499-504.
- Evans SL, Davy KP, Stevenson ET, Seals DR. Physiological determinants of 10-km performance in highly trained female runners of different ages. *J Appl Physiol* 1995;78:1931-1941.
- Farrell PA, Wilmore JH, Coyle EF, Billing JE, Costill DL. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports* 1979;11:338-344.
- Fay L, Londeree BR, Lafontaine TP, Volek MR. Physiological parameters related to distance running performance in female athletes. *Med Sci Sports Exerc* 1989;21:319-324.
- Föhrenbach R, Madr A, Hollmann W. Determination of endurance capacity and prediction of exercise intensities for training and competition in marathon runners. *Int J Sports Med* 1987;8:11-18.
- Foster C, Daniles JT. Running by the numbers. *Runner's World* 1975;10:14-17.
- Grant S, Craig I, Wilson J, Aitchison T. The relationship between 3 km running performance and selected physiological variables. *J Sports Sci* 1997;15:403-410.
- Hagan RD, Smith MG, Gettman LR. Marathon performance in relation to maximal aerobic power and training indices. *Med Sci Sports Exerc* 1981;13:185-189.
- Houmard JA, Craib MW, O'Brien KF, Smith LL, Israel RG, Wheeler WS. Peak running velocity, submaximal energy expenditure, VO_2 max, and 8 km distance running performance. *J Sports Med Phys Fitness* 1991;31:345-350.
- Housh TJ, Thorland WG, Johnson GO, Hughes RA, Cisar CJ. Body composition and body build variables as predictors of middle distance running performance. *J Sports Med Phys Fitness* 1986;26:258-262.
- Housh TJ, Thorland WG, Pohnson GO, Hughes RA, Cisar CJ. The contribution of selected physiological variables to middle distance running performance. *J Sports Med Phys Fitness* 1988;28:20-26.
- Iwaoka K, Hatta H, Atomi Y, Miyashita M. Lactate, respiratory compensation thresholds, and distance running performance in runners of both sexes. *Int J Sports Med* 1988;9:306-309.
- Juel C. Lactate/proton co-transport in skeletal muscle: regulation and importance for pH homeostasis. *Acta Physiol Scand* 1996;156:369-374
- Keeney WL, Hodgson JL. Variables predictive of performance in elite middle-distance runners. *Brit J Sports Med* 1985;4:207-209.
- Maffulli N, Capasso G, Lancia A. Anaerobic threshold and performance in middle and long distance running. *J Sports Med Phys Fitness* 1991;31:332-338.
- Mahon AD, Del Corral P, Howe CA, Duncan GE, Ray ML. Physiological correlates of 3-kilometer running performance in male children. *Int J Sports Med* 1996;17:580-584
- Martin DE, Coe PN. Training distance runners, pp 149. Human Kinetics, Champaign IL, 1991.
- Meyer T, Welter JP, Scharhag J, Kindermann W. Maximal oxygen uptake during field running does not exceed that measured during treadmill exercise. *Eur J Appl Physiol* 2003;88:387-389.

- Morgan DW, Baldini FD, Martin PE, Kohrt WM. Ten kilometer performance and predicted velocity at VO_2 max among well-trained male runners. *Med Sci Sports Exerc* 1989;21:78-83.
- Myers, M.J., Steudel, K. Effect of limb mass and its distribution on the energetic cost of running. *J Exp Biol* 1985;116:363-373.
- Nicholson RM, Sleivert GG. Indices of lactate threshold and their relationship with 10-km running velocity. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:339-342.
- Noakes TD. Lore of Running. 4^a edición, Human Kinetics, Champaign, IL, 2003.
- Noakes TD, Myburgh KH, Schall R. Peak treadmill running velocity during the VO_2 max test predicts running performance. *J Sports Sci* 1990;8:35-45.
- Noakes TD. Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a contemporary perspective. *Med Sci Sports Exerc* 1988;20:319-330.
- Nummela A, Hamalainen I, Rusko H. Comparison of maximal anaerobic running tests on a treadmill and track. *J Sports Sci* 2007;25:87-96.
- Nummela AT, Paavolainen LM, Sharwood KA, Lambert MI, Noakes TD, Rusko HK. Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. *Eur J Appl Physiol* 2006;97:1-8.
- O'Brien MJ, Viguie CA, Mazzeo RS, Brokks GA. Carbohydrate dependence during marathon running. *Med Sci Sports Exerc* 1993;25:1009-1017.
- Olesen HL, Raabo E, Bangsbo J, Secher NH. Maximal oxygen deficit of sprint and middle distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1994;69:140-46.
- Paavolainen L, Nummela A, Rusko H. Muscle power factors and VO_2 max as determinants of horizontal and uphill running performance. *Scand J Med Sci Sports* 2000;10:286-291.
- Paavolainen LM, Nummela AT, Rusko HK. Neuromuscular characteristics and muscle power as determinants of 5-km running performance. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:124-130.
- Padilla S, Bourdin M, Barthelemy JC, Lacour JR. Physiological correlates of middle-distance running performance. A comparative study between men and women. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1992;65:561-566.
- Péronnet F (coord) Maratón. INDE, Barcelona 2001.
- Petit MA, Nelson CM, Rhodes EC. Comparison of a mathematical model to predict 10-km performance from the Conconi test and ventilatory threshold measurements. *Can J Appl Physiol* 1997;22:562-572.
- Ramsbottom R, Nevill AM, Nevill ME, Newport S, Williams C. Accumulated oxygen deficit and short-distance running performance. *J Sports Sci* 1994;12:447-453.
- Roecker K, Schotte O, Niess AM, Horstmann T, Dickhuth HH. Predicting competition performance in long-distance running by means of a treadmill test. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:1552-1557.
- Saltin B. The Kenya Project - Final report (part 2). *New Studies in Athletics* 2003;18: 15-26.
- Scott BK, Houmard JA. Peak running velocity is highly related to distance running performance *Int J Sports Med* 1994;15:504-507.
- Scrimgeour AG, Noakes TD, Adams B, Myburgh K. The influence of weekly training distance on fractional utilization of maximum aerobic capacity in marathon and ultramarathon runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1986;55:202-209.
- Slattery KM, Wallace LK, Murphy AJ, Coutts AJ. Physiological determinants of three-kilometer running performance in experienced triathletes. *J Strength Cond Res* 2006;20:47-52.

Slovic P. Empirical study of training and performance in the marathon. *Res Q* 1977;48:769-777.

Sparling PB, Cureton KJ. Biological determinants of the sex difference in 12-min run performance. *Med Sci Sports Exerc* 1983;15:218-223.

Spencer MR, Gustin PB. Energy system contribution during 200 to 1500m running in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:157-162.

Spencer MR, Gustin PB, Payne WR. Energy contribution in the 400 – 1500m events. *New Studies in Athletics* 1996;11:59-65.

Takeshima N, Tanaka K. Prediction of endurance running performance for middle-aged and older runners. *Br J Sports Med* 1995;29:20-23.

Weyand PG, Cureton KJ, Conley DS, Sloniger MA, Liu YL. Peak oxygen deficit predicts sprint and middle-distance track performance. *Med Sci Sports Exerc* 1994;26:1174-1180.

Yoshida T, Udo M, Iwai K, Yamaguchi T. Physiological characteristics related to endurance running performance in female distance runners. *J Sports Sci* 1993;11:57-62.

Zacharogiannis E, Farrally M. Ventilatory threshold, heart rate deflection point and middle distance running performance. *J Sports Med Phys Fitness* 1993;33:337-347.

1.4.- Evolución histórica del entrenamiento de las carreras de fondo

Dado que en este apartado nos centramos en los momentos históricos donde está documentada una evolución del entrenamiento para las carreras de fondo en sentido estricto, el lector advertirá saltos en el tiempo notables frente a una mayor atención a otros momentos históricos. Fundamentalmente hablaremos de 3 momentos históricos que entendemos han mostrado avances significativos en este asunto: La Antigua Grecia, el siglo XIX y el siglo XX.

La Antigua Grecia

Como ya se indicó en el punto 1.1, el atletismo, y especialmente las carreras, nacieron en la antigua civilización griega, desde los antiguos Juegos Olímpicos.

La mejora del rendimiento comprendía una dedicación completa al entrenamiento, la discusión filosófica, la alimentación y el descanso. Ya se asumía que debían entrenarse con unos diez meses de antelación antes de la competición, de los cuales al menos uno de ellos se debía realizar en la ciudad de Élite.

Parece que existía un desarrollo notable relativo a la época y su tecnología en las técnicas, medios e incluso formas de programación. Así, se sabe por ejemplo que se distinguía, como se hace hoy en día, la técnica de un corredor de velocidad de la de un fondista. Se indicaba que los primeros debían balancear los brazos al frente con apoyo más de punta, mientras el fondista debía llevar los brazos relajados pegados al cuerpo, con el tronco ligeramente inclinado adelante y apoyo de planta (Hegedüs 1984).

Existían ya medios de entrenamiento actuales, como el trabajo con autocargas o ciertas sobrecargas, como un compañero, sacos de arena o incluso con halteras, algo documentado hacia la mitad del siglo III a.c., ya Filóstrato en su obra "*La gimnástica*". Se realizaban ya multilanzamientos con piedras, carreras en

arena, y ejercicios del tipo "*skipping*" y carreras en múltiples direcciones.

Habían deportistas profesionales, así como entrenadores profesionales (y esto tardó muchos años en retomarse en la era moderna). Uno de los entrenadores mejor pagados fue Theagenes de Thasos. Estos entrenadores utilizaban ya un modelo de programación, el tetra, que consistía en lo que hoy llamaríamos un microciclo de cuatro días. El primero de esos días se realizaba un entrenamiento suave, de preparación, para que el segundo fuera un entrenamiento muy intenso. Ya respetando el principio de regeneración periódica, el tercero de los días era día de descanso o bien lo que hoy llamaríamos de descanso activo, un día de recuperación. El cuarto día era un día de intensidad media, menor que la del segundo pero mayor que los otros dos.

Ya en esta antigua civilización griega existen datos para corroborar que el entrenamiento de resistencia tuvo origen en los ámbitos militares.

Esto no resulta extraño en una sociedad donde se valoraba el rendimiento deportivo asumiendo que dicha capacidad de sufrimiento se relacionaría con la responsabilidad en el campo de batalla (Hegedüs 1984).

Es clásico el mito de Filípides comunicando la victoria en lo que hoy en día es la prueba atlética del maratón. Ciertamente este hecho agrupa dos conceptos básicos en el origen de los métodos de la resistencia: por una parte la importancia de la carrera, y en particular del atletismo como deporte que hiciera evolucionar inicialmente los métodos de entrenamiento, y por otra los orígenes en esos emisarios (militares o no) cuya labor es recorrer grandes distancias a pie.

El Siglo XIX

Si bien existen también precedentes en la civilización otomana (los emisarios llamados "*peichs*"), es en la Inglaterra del s.XVIII donde destacaron los corredores-carteros ("*running footmer*"), con quienes se desarrollarían apuestas remunerando al más rápido. La carrera era así mismo la actividad física más popular, siendo el medio principal del entrenamiento militar. Todo ello derivó en una gran afición por las

carreras en este país. Los citados carteros empezaron a ser motivo de apuestas entre las gentes adineradas, y todo ello derivó en la aparición de corredores "profesionales", habitualmente entre la aristocracia (Hegedüs 1984). Existen libros de la época que recogen las hazañas de esos corredores, destacando al capitán Robert Barclay Allardice, quien ya recorriera, por ejemplo, las 440 yardas (404 m) en 56 s o las 2 millas (3218m) en 9 min 57 s (Tom 1883).

Pero las recomendaciones de entrenamiento para esos profesionales iban por grandes cantidades de trabajo de caminatas y trotes generalmente de baja intensidad repetidos diversas veces al día.

También entonces existía la idea de que la vida de un deportista de resistencia debía tener un régimen "espartano". Se recomendaba el siguiente programa de entrenamiento, que resulta muy curioso hoy día: levantarse a las 5:00 AM, correr media milla rápido y seguidamente trotar 8 kms. El desayuno se componía de pan negro con carne y cerveza. A media mañana se recorrían en trote de 8 a 13 kms. Antes de la comida de mediodía realizaban una siesta seguida de unos 6km de caminata. Hacia las 16:00 realizaban la comida principal (carne y cerveza) a la que seguía una carrera rápida. Ya a última hora trotaban suavemente 8 kms. Cada 4 semanas descansaban una, realizando baños turcos durante la misma.

A finales de s XIX las competiciones consisten en cumplir rendimiento en bandas horarias (ejemplo: cuántos kms en 1 hora). Pero la duración era mucho mayor. La 1ª competición documentada fue sobre 3 horas y de ahí se pasó a las de 6 horas (Hegedüs 1984). La afición por las carreras cruza el atlántico, y no tardan en llegar las competiciones entre británicos y norteamericanos. Como ejemplo de los rendimientos alcanzados, en 1877 Daniel O'Leary (USA) totalizó 836 km; promedio diario 139. Once años después George Littlewood (ING) totalizó 1003 km; promedio diario 167 (Hegedüs 1984).

Por tanto, los primeros medios de entrenamiento de la resistencia fueron la marcha (caminar) y el trote. En cualquier caso métodos continuos cuya evolución

consistió en desarrollar una mayor duración, con esporádicas variaciones de la intensidad.

La afición en Norteamérica se extiende a pruebas más cortas, y nace otro método de entrenamiento: dividir la distancia de competición en varios tramos, que tratan de realizarse a intensidad de competición o superior tras recuperaciones amplias. Éste método es llamado "tempo training" por entrenadores como Murphy, Cronwell y Robertson. Como ejemplo de la evolución de rendimientos, en 1879 el atleta Lon Myers corre en 49.2 s las 440y (404m). En 1895 Hill Patrick corre en 1 min 53 s la ½ milla (804,5m). Sin el entrenamiento de intensidad esto muy difícilmente hubiera sido posible. Nace pues el entrenamiento "fraccionado" frente al continuo (Hegedüs 1984). Autores actuales como Billat llaman al entrenamiento "fraccionado" el realizado al estilo del citado "tempo training", aunque hoy en día no se llame así. De ahí que sitúen el "interval training" más adelante, si bien por ejemplo la literatura norteamericana actual suele englobar bajo el nombre "interval training" a todo tipo de entrenamiento fraccionado.

El Siglo XX

Dando un salto en la historia, a la búsqueda de la invención de nuevos métodos, en 1912, en la final de los 5000m de los JJOO de Estocolmo, un corredor finlandés, Hans Kolehmainen, bate con el pecho a la figura de la época, Jean Bouin, estableciendo así mismo una nueva plusmarca mundial (14 min 36 s). También ganará los 10000m en esos juegos.

Se cuenta que su hermano William, que emigró a los Estados Unidos años antes y era también corredor aunque no destacase a ese nivel, se carteo con él al respecto de las formas de entrenamiento desarrolladas en el nuevo continente. Lógicamente, ampliar el uso del entrenamiento fraccionado a las distancias de fondo permitió unas mejoras espectaculares en corredor del talento de Hans (Hegedüs 1984). Billat (2001a) sitúa en este momento los orígenes del llamado "interval training", en entrenamientos realizados por dicho atleta del estilo 5 a 10 repeticiones de 1000m en 3 min 5 s, con recuperaciones relativamente amplias. Kolehmainen inicia

una afición en su país que pasando por atletas como Paavo Nurmi y entrenadores como Pihkala que siguieron la tradición finlandesa que se prolongaría hasta los años ochenta. Todos seguirían usando ese entrenamiento de "velocidad" con recuperaciones amplias.

El récord mundial en 1911 lo estableció Jean Bouin en 30 min 58 s. Nurmi pasa de correr los 10 km en 31 min 45 s en 1916 a correr en 30 min 6 s en 1924. Consiguió 7 victorias olímpicas, 22 récords mundiales oficiales y 10 no-oficiales, pues fue catalogado de "profesional" y sancionado por ello de por vida para las competiciones oficiales. Frente al peculiar y enorme entrenamiento de aquellos pretéritos corredores del s.XIX, asusta imaginar el significado real de las palabras de un corredor que era calificado de modesto y solitario como Nurmi, cuando manifestó que "...nadie es capaz de imaginarse cuánto me entreno". Hasta el año 1936 ningún corredor superó la marca de Nurmi en 10 km, y ya en 1939 otro finlandés, Taisto Mäki, baja de los 30 minutos (29 min 52 s) (Hegedüs 1984).

Pero muchos autores y especialmente los entrenadores entienden que el "interval training" tiene su origen con posterioridad. Se cuenta que el checo Emil Zatopek entrenaba "a la antigua" hasta que supo de unos artículos publicados por el profesor y entrenador alemán Toni Nett al respecto de realizar pausas más breves en los entrenamientos fraccionados. Zatopek pasó a poner en práctica dichas ideas y desarrollar sus propios métodos basados en una intensidad relativamente elevada alternada con trotes suaves más bien breves (Hegedüs 1984)..

Distinto al método continuo de entrenamiento que aprovechaba el medio natural para realizar cambios de ritmo en ocasiones espontáneos ("fartlek") inventado en Suecia en los años treinta, Zatopek llegaba a repetir tramos de 200 a 400 durante gran número de ocasiones (50 hasta 100) con pausas breves o trotes de 150-200m por fuera de la cuerda de la pista. Se ha calculado que la intensidad aproximada sería la de la velocidad crítica (cercana pues a la del "umbral anaeróbico" para los profanos en dicho concepto) (Billat 2001a). Zatopek dominó todas las

distancias entre 1947 y 1953. El mundo se preguntaba qué habría que hacer para superar su rendimiento y él contestó "mejorad mi sistema y batiréis todas mis marcas" (Hegedüs 1984). También usarían notablemente el "interval training" corredores míticos como Vladimir Kutz (13 min 35 s en 5000m) o Roger Banister (Billat 2002).

Cierto es que el desafío fue tomado por numerosos deportistas de diversos deportes como el atletismo, la natación o el remo, pasando a probar nuevas formas de mejorar los entrenamientos de Zatopek, con más duración o especialmente con mayor intensidad. Pero ello hace que muchos fracasen con estrépito en su intento, y el método pasa a ser rechazado en diversos grupos famosos de entrenamiento, que optan por "volver al entrenamiento en la naturaleza", o buscar una versión más ecléctica y moderada.

Los profesores de la Universidad de Friburgo Gerschler y Reindell, entrenador y médico, junto con sus colaboradores, investigaron este método de entrenamiento valorando miles de deportistas y evaluando las ventajas del intervalo breve de la pausa en esfuerzos de alta intensidad.

Reindell y Roskamm publican en 1959 el primer artículo científico. En él citan ya los términos de "Entrenamiento de intervalos", así como de "pausa provechosa". Para muchos nace aquí el entrenamiento con intervalos, entendido como "interval training", especialmente entrenadores, al respecto de las pausas breves y su beneficio (Hegedüs 1984).

Todo ello favoreció a que en las antípodas (Australia y Nueva Zelanda) se iniciara un cambio en el modo de entrenar, en este caso en forma de retorno al entrenamiento en contacto con el medio natural, y alejado de tanta sistematización científica. Parece que uno de los precursores en este sentido fue Percy Cerutti, australiano que conoció a Oländer en Volodalen y del que por tanto asimiló ese entrenamiento de fartlek y demás trabajos de fuerza en la naturaleza, que él traspasó a la naturaleza no menos exuberante aunque distinta de Australia, donde en la ciudad de Portsea entrenó con esas premisas. Añadió el trabajo fraccionado a alta intensidad, el trabajo de velocidad y el trabajo de fuerza, usando las

dunas de arena como forma novedosa de entrenamiento (Hegedüs 1984).

También en Australia va a destacar el inicio de los grandes volúmenes de entrenamiento, como en el grupo de Glenhully, cuyos corredores llegaban a hacer 200 kms/semana en algunos momentos de la temporada (Hegedüs 1984).

Estas formas de trabajo eclécticas y adaptadas a la naturaleza del lugar, también se pasan a usar en Nueva Zelanda, donde destacará la figura de Arthur Lydiard, con su propia mezcla, añadiendo una especie de interval alternando 10-15 s fuerte (alrededor de $VO_2\text{max}$ se cree), con 10-15 s de trote muy suave o andar (alrededor del 30-40% de $VO_2\text{max}$ se cree) y llega a entrenar al triple campeón olímpico Peter Snell, *recordman* en su día de los 800 ml (Hegedüs 1984).

En 1960 Astrand y colaboradores promulgan el entrenamiento con recuperación completa y repeticiones de 3 min al 95% a la velocidad mínima que solicita el $VO_2\text{max}$ ($vVO_2\text{max}$). Ese mismo año Christensen y colaboradores estudian el efecto de esfuerzos de 5 s a la $vVO_2\text{max}$ alternados con 5 s de recuperación pasiva, o bien 10 s /10 s, 15 s /15 s... durante 30 min hallando valores de lactato en sangre de 2,5 a 5,6 $\text{mMol}\cdot\text{L}^{-1}$ y consumos del 89-100% del $VO_2\text{max}$ (Billat 2001a). Ambos grupos de investigadores se unirán en futuros trabajos.

El peso del rendimiento en carreras de fondo se trasladó desde los años sesenta hacia el dominio africano. Sin embargo, apenas puede decirse algo particular respecto a que hayan desarrollado especiales métodos de entrenamiento, más allá de una posible mayor tolerancia al entrenamiento intenso (Coetzer *et al* 1993), que no está claro si es por preferencia y acumulación de entrenamiento de calidad, por los años de residencia en altitud, o por una predisposición genética para ello (Billat *et al* 2003).

Lógicamente los métodos de entrenamiento siguen estudiándose, pero su evolución

parece muy ralentizada, y probablemente lo más destacado en las últimas décadas haya sido la mayor inclusión del entrenamiento de fuerza (Berg 2003).

Lo que ha llamado más la atención en las últimas décadas ha sido el seguimiento longitudinal de diversos tipos de programas o acentuación de alguno de los componentes de los mismos. Para no entrar en solapamientos con los puntos 1.6 o 1.10, simplemente indicaremos que parece que buena parte del interés actual recae en diversas aproximaciones científicas a los programas de entrenamiento evaluando el énfasis de la intensidad o el volumen en deportistas de fondo en general (Fiskestrand y Seiler 2004, Seiler y Kjerland 2004, Billat *et al* 2001b, Gaskill *et al* 1999).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ESTE APARTADO:

Astrand I, Astrand PO, Christensen EH *et al*. Intermittent muscular work. *Acta Physiol Scand* 1960;48:448-453.

Astrand PO, Rodahl K. Textbook of work physiology. New York: McGraw-Hill, pp 423-427, 1986.

Berg K. Endurance training and performance in runners. Research limitations and unanswered questions. *Sports Med* 2003;33:50-73.

Billat V, Lepretre PM, Heugas AM, Laurence MH, Salim D, Koralsztein JP. Training and bioenergetic characteristics in elite male and female Kenyan runners. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35:297-304.

Billat V. Fisiología y metodología del entrenamiento. Paidotribo, Barcelona 2002.

Billat V. Interval training for performance: A scientific and empirical practice. Special recommendations for middle- and long-distance running. Part I: Aerobic Interval Training. *Sports Med* 2001a;31:13-31.

Billat V, Demarle A, Slawinski J, Paiva M, Koralsztein JP. Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med Sci Sports Exerc* 2001b;33:2089-2097.

Bompa T. Periodización. Teoría y metodología del entrenamiento. Hispano-Europea, Barcelona 2003.

Chistensen EH, Hedman R, Saltin B. Intermittent and continuous running. *Acta Physiol Scand* 1960;50:269-286.

Coetzer P, Noakes TD, Sanders B, Lambert MI, Bosch AN, Wiggins T, Dennis SC. Superior fatigue resistance of elite black South African distance runners. *J Appl Physiol* 1993;75:1822-1827.

Essen B. Glycogen depletion of different fibre types in human skeletal muscle during intermittent and continuous exercise. *Acta Physiol Scand* 1978;103:446-455.

Fiskestrand A, Seiler KS. Training and performance characteristics among Norwegian international elite rowers 1970-2001. *Scand J Med Sci Sports* 2004;14:303-310.

Gaskill SE, Serfass RC, Bacharach DW, Kelly JM. Responses to training in cross-country skiers. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:1211-1217.

Hegedüs J. La ciencia del entrenamiento deportivo. Stadium, Buenos Aires, 1984.

Reindell H, Roskamm H (citado por Hegedüs 1984). Ein Beitrag zu den physiologischen Grundlagen des Intervall training unter besonderer Berücksichtigung des Kreilaufes. *Schweiz Z Sportmed* 1959;7:1-8.

Seiler KS, Kjerland KO. Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: Is there evidence for an 'optimal' distribution? *Scand J Med Sci Sports* 2004;16:49-56,2006.

Tom W (citado por Hegedüs 1984) "Pedestrianism, or an account on the performance of Celebrated Pedestrians during he last and present Century with a full Narrative of Captain Barclay's public and private Matches and an Essay on Training". Aberdeen, 1883.

1.5.- Adaptaciones Longitudinales

No son muchos los trabajos que han estudiado la evolución de las características fisiológicas de los corredores/as de fondo. Por ello, algunos de estos trabajos tienen gran valor documental, destacando, de los aquí citados, los trabajos del grupo de Trappe y colaboradores y los de Jones, con evaluaciones periódicas durante 15 años de la *recordwoman* mundial de maratón Paula Radcliffe desde que ésta tenía 17 años de edad.

En este punto analizaremos en primer lugar la evolución longitudinal de los factores que lo determinan, y posteriormente de las características morfológicas y metabólicas.

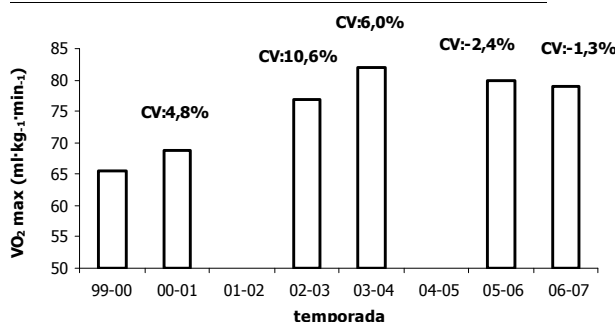
EVOLUCIÓN DE LOS DETERMINANTES DEL RENDIMIENTO DEL CORREDOR/A CON LA EDAD

VO₂max y función cardiovascular en general

Se sabe que esta variable puede mejorar de un 5 a un 25% por lo general (Mc Ardle *et al* 2004). Generalmente se asume que, llegado un punto, las mejoras se estabilizan (Jones 2006). Un ejemplo de este tipo de mejoras la muestra uno de nuestros corredores en la figura 1.5.1.

Figura 1.5.1

Ejemplo de la evolución del VO₂max en un corredor español de nivel nacional durante 8 temporadas de entrenamiento sistemático



CV: Coeficiente de Variabilidad (% de mejora respecto a evaluación previa)

Murase y colaboradores (1981) estudiaron a algunos de los mejores fondistas japoneses júnior desde los 12 a los 18 años. Observaron mejoras de hasta un

14% del VO₂max en valor relativo y hasta 23% en valor absoluto en aquellos que entrenaron de forma intensiva durante todo ese tiempo, alcanzando niveles medios de 75 ml·kg⁻¹·min⁻¹, que en alguno de ellos llegó a 80 ml·kg⁻¹·min⁻¹ con 18 años. Estos corredores recorrían una media de 90 km / semana entre los 16 y 18 años. A esa edad de 18 años, la actual *recordwoman* mundial de maratón mostraba 72 ml·kg⁻¹·min⁻¹, niveles habituales a largo del resto de su carrera deportiva, pero en su caso sin gran experiencia previa de entrenamiento (por aquél entonces solo corría 40-50 kms semanales).

Parece que los jóvenes que sean moderadamente activos en carrera mejoran su VO₂max con la edad, pero no en su expresión relativa, por la ganancia de peso (Daniels *et al* 1978, Daniels y Oldbridge 1971), a no ser que estén involucrados en un proceso de entrenamiento. El trabajo de Murase y colaboradores (1981), conjuntamente con otro estudio longitudinal paralelo en jóvenes japoneses no-atletas (Kobayashi *et al* 1978), muestra que el VO₂max de los jóvenes corredores de elite enrolados en programas intensivos es un 40% superior al de los jóvenes de su edad. Sin embargo, si este entrenamiento se abandona, los niveles de VO₂max descienden drásticamente el primer año, y en un par de años se sitúan levemente por encima de los jóvenes de su edad.

Los niveles habituales de VO₂max de corredores/as de elite (como se indicó en el punto 1.2), oscilan habitualmente entre los 70-85 y los 60-75 ml·kg⁻¹·min⁻¹ en hombres y mujeres, respectivamente (Smith *et al* 2000).

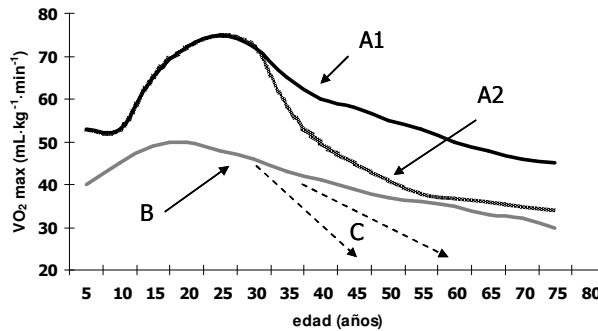
Estos valores, sin embargo, descendieron en un ~33% con el desentrenamiento a lo largo de 22 años, en el extraordinario trabajo de Trappe y colaboradores (1996) del que se hablará bastante a lo largo de este apartado.

Del conjunto de estos estudios se ha elaborado la figura 1.5.2, describiendo la posible tendencia del VO₂max con la edad en corredores masculinos que entrenen desde los 12 años y alcancen resultados destacados.

Figura 1.5.2

Evolución teórica del $VO_2\text{max}$ de un corredor de alto nivel según su nivel de actividad el resto de su vida frente a un sedentario sin sobrepeso

(a partir de los datos de San Juan 2007, Jones 2006, Trappe *et al* 1996, Krahenbuhl 1985, Murase *et al* 1981)



A1: corredor de alto nivel que entrenase sistemáticamente desde los ~12 años hasta los ~30 y en adelante mantuviera la actividad atlética.

A2: mismo caso pero que a partir de los 30 dejase de hacer ejercicio por completo y se mantuviera entre 65-75kg de peso.

B: joven poco activo que fuese sedentario el resto de la vida y se mantuviera entre 65-75kg de peso.

C: Sobrepeso, obesidad y otras enfermedades

Las causas del descenso natural que, en cualquier caso, se dará en el $VO_2\text{max}$, se han relacionado fundamentalmente con reducciones de la FC máxima, contractilidad del miocardio, capacidad de los vasos sanguíneos coronarios, pérdida de masa muscular esquelética y de su contractilidad (Noakes 2003). El sobrepeso, la obesidad y otras enfermedades comportarán descensos mayores, que aproximarán el nivel hacia el mínimo o por debajo del mínimo de la ordenada de la figura 1.5.2 (Mc Ardle *et al* 2004).

Umbral Anaeróbico

Como es de esperar, se ha observado que incluso en atletas veteranos que mantienen su entrenamiento hasta los 50 o 70 años, el rendimiento disminuye pese al entrenamiento (Marcell *et al* 2003, Trappe *et al* 1995).

Pero los niveles de lactato en los que ocurre el umbral anaeróbico no parecen cambiar, y el VO_2 levemente (Marcell *et al* 2003) (con el método visual del incremento de lactato en esfuerzo).

Así, debido al mayor descenso del $VO_2\text{max}$, el % del umbral anaeróbico aumenta entre los ~40 y 70 años (Marcell *et al* 2003, Wiswell *et al* 2000).

El valioso trabajo de Jones (2006) con la *recordwoman* mundial de maratón Paula Radcliffe muestra mejoras en la curva de lactato en las que el umbral láctico (1er umbral) evolucionó desde los 14-15 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ con 18-20 años a los 18,5 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ con 29 años (2003, cuando estableció el récord mundial en el maratón de Londres). El 2º umbral pasó de los 16 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ con 18 años a los 20,0 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ con 29 años.

Economía de carrera

Siguiendo con los datos de Jones, la economía en dicha atleta representa, si cabe, el aspecto más extraordinario de su perfil fisiológico (como podrá observarse en la figura 3.8.8. del apartado 3.8). Expresada en $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, tuvo una mejora continua de 205 a 175 de los 18 a los 29 años, y parece seguir mejorando, habiéndose registrado 165 con posterioridad. Ello permitió que la VAM, pese a que el $VO_2\text{max}$ se estabilizara, mejorase muy linealmente de 20,5 con 18 años a 23,5 con 29.

El conjunto de los datos de Jones respecto a Paula Radcliffe son similares a los indicados respecto al ciclista Lance Armstrong por Coyle (2005), de modo que la evolución de este aspecto parece la clave de la evolución el rendimiento en los años en que éste mejora o se mantiene.

Ambos trabajos reportaron así mismo lactatos pico inferiores con los años a los habituales en otros corredores/as o ciclistas medidos en los respectivos laboratorios, sugiriéndose importantes mejoras los aspectos periféricos de la función aeróbica y su metabolismo (capilares, mitocondrias, enzimas, uso de grasas...) (Jones 2006).

De forma natural, la economía mejora con los años en los niños y jóvenes no atletas (Ariëns *et al* 1997, Krahenbuhl *et al* 1989, Daniels *et al* 1978), y parece seguir mejorando algunos años pasados los 20 (Ariëns *et al* 1997), para posteriormente empeorar en niveles absolutos, ya que por

la ganancia de peso los niveles relativos se mantienen (Trappe *et al* 1996). Pero los niveles más importantes los obtienen sin duda los/as atletas muy entrenados.

Por nuestro conocimiento, no existen datos longitudinales sobre la capacidad y potencia anaeróbica de los corredores, pero a tenor de las edades de los competidores de las diversas pruebas, de la tendencia de los atletas a pasarse a distancias más largas con los años, y de las adaptaciones anteriormente expuestas se presume que habrá un empeoramiento notable de las mismas pasados los 25-30 años.

Computando todos los aspectos, parece que un nivel inicial elevado de $VO_2\max$ (junto con la masa muscular en hombres), es lo que más determina el rendimiento futuro en corredores/as veteranos/as (Marcell *et al* 2003, Evans *et al* 1995).

EVOLUCIÓN DE LOS ASPECTOS MORFOLÓGICOS Y METABÓLICOS DEL CORREDOR/A CON LA EDAD

Tipo de fibras, capilarización y actividad enzimática

Parece que hay una tendencia natural a incrementar la cantidad de fibras tipo I con la edad, independiente de la cantidad de entrenamiento que se realice. Así mismo en el área transversal de las fibras tipo I y II (Trappe *et al* 1995). La ventaja del entrenamiento en este sentido es la capacidad de compensar ese y otros deterioros de la masa muscular (Noakes 2003).

La densidad capilar, el número de capilares por fibra, y la actividad de las enzimas *CS* y *SDH* de los corredores parece superior por efecto del entrenamiento a lo largo de los años en la edad avanzada (Trappe *et al* 1995).

Antropometría y morfología

Los corredores que se mantienen activos mantienen también su peso en niveles parecidos (aumentos de 1 a 4 kgs), mientras que los que abandonan los incrementan en 9-15 kgs o más (Trappe *et al* 1996, Marti y Howald 1990).

Otros

Otras capacidades de los corredores empeoran con la edad, como la capacidad para absorber el impacto o la capacidad de recuperación (Noakes 2003), que pueden tener que ver con el deterioro de la función muscular y las ganancias de peso.

Por otra parte diversas investigaciones han mostrado que, en el global de los deportes, los jóvenes con talento que alcanzan la elite emplean entre 8 y 12 años para ello (Ericsson y Charness 1994, Ericsson *et al* 1993, Bloom 1985). Esto se ha llamado "la regla de los 10 años o las 10.000 horas". Un aspecto a destacar en los corredores veteranos, que guarda relación con la "regla de los 10 años", es que los que alcanzan éxito en categorías por encima de los 40 no eran habitualmente los mejores corredores cuando tenían 20 (Noakes 2003).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ESTE APARTADO:

Ariëns GAM, Van Mechelen W, Kemper ACG, Twisk JWR. The longitudinal development of running economy in males and females aged between 13 and 27 years: The Amsterdam Growth and Health Study. *Eur J Appl Physiol* 1997;76:214-220.

Bloom, B. Developing Talent in Young People. New York: Ballantines, 1985.

Coyle EF. Improved muscular efficiency displayed as Tour de France champion matures. *J Appl Physiol* 2005;98:2191-2196.

Daniels J, Oldbridge N, Nagle F, White B. Differences and changes in VO_2 among young runners 10-18 years of age. *Med Sci Sports Exerc* 1978;10:200-203.

Daniels J, Oldbridge N. Changes in oxygen consumption of young boys during growth and running training. *Med Sci Sports Exerc* 1971;3:161-165.

Ericsson KA, Charness N. Expert Performance. Its Structure and Acquisition. *American Psychologist* 1994;725-747.

Ericsson KA, Krampe RT, Romer T. The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review* 1993;100:363-406.

Evans SL, Davy KP, Stevenson ET, Seals DR. Physiological determinants of 10-km performance in highly trained female runners of different ages. *J Appl Physiol* 1995;78:1931-1941.

Jones AM. The physiology of the World Record Holder for the Women's Marathon. *Int J Sports Sci and Coaching* 2006;1:101-116.

Kobayashi K, Kitamura K, Miura M. Aerobic power as related to growth and training in Japanese boys: a longitudinal study. *J Appl Physiol* 1978;44: 666-672.

Krahenbuhl GS. Developmental aspects of maximal aerobic power in children. EN: Exercise and Sports Sciences Reviews, Rerjung (Ed) New York, 1985.

Marcell TJ, Hawkins SA, Tarpinning KM, Hyslop DM, Wiswell RA. Longitudinal analysis of lactate threshold in male and female master athletes. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35:810-817.

Marti B, Howald H. Long-term effects of physical training on aerobic capacity: controlled study of former elite athletes. *J Appl Physiol* 1990;69:1451-1459.

McArdle WD, Katch FI, Katch VL. Fundamentos de fisiología del ejercicio. McGraw Hill Interamericana, Aravaca-Madrid 2004.

Murase Y, Kobayashi K, Kamei S, Matsui H. Longitudinal study of aerobic power in superior junior athletes. *Med Sci Sports Exerc* 1981;13:180-184.

Noakes T. Lore of Running (4^{ed}). Human Kinetics, Champaign-IL, 2003.

San Juan AF, Chamorro-Vina C, Mate-Munoz JL, Fernandez Del Valle M, Cardona C, Hernandez M, Madero L, Perez M, Ramirez M, Lucia A. Functional Capacity of

Children with Leukemia. *Int J Sports Med* 2007; Sep 18; [Epub ahead of print]

Smith D, Telford R, Peltola E, Tumilty D. Protocols for the Physiological Assessment of High-Performance Runners, EN: Gore CJ, Ed, Physiological Tests for Elite Athletes, Australian Sports Commission, Human Kinetics, Champaign IL, pp 334-344, 2000.

Trappe SW, Costill DL, Vokovich MD, Jones J, Melham T. Aging among elite distance runners: a 22-yr longitudinal study. *J Appl Physiol* 1996;80:285-290.

Trappe SW, Costill DL, Fink WJ, Pearson DR. Skeletal muscle characteristics among distance runners: a 20-yr follow-up study. *J Appl Physiol* 1995;78:823-829.

Wiswell RA, Jaque SV, Marcell TJ, Hawkins SA, Tarpinning KM, Constantino N, Hyslop DM. Maximal aerobic power, lactate threshold and running performance in master athletes. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32: 1165-1170.

1.6. Componentes de la Carga de Entrenamiento

La carga de entrenamiento se compone de volumen de entrenamiento, intensidad, y recuperación. En este apartado definiremos sus características y explicaremos su importancia en el proceso de entrenamiento del corredor de fondo.

Volumen

El volumen de entrenamiento define la parte cuantitativa de la carga de entrenamiento (Verjoshanski 1990). Hay que distinguirlo de la "duración", pues el volumen se ciñe al tiempo o distancia real de esfuerzo, mientras que la duración incluye las posibles pausas en el mismo o en la totalidad de la sesión (Bompa 1994). También se utilizan el número total de kilogramos, repeticiones o apoyos de los ejercicios en el caso del entrenamiento de fuerza con sobrecargas, técnica o saltos.

Ninguna variable puede unificar la cuantificación de todos los aspectos del entrenamiento, más allá de la duración, que sin embargo, es imperfecta tanto en la

resistencia por lo anteriormente indicado sobre las pausas como lógicamente en contenidos como la fuerza, la velocidad o la técnica.

El volumen puede definirse como la cantidad total de trabajo realizado por sesión o ciclo de entrenamiento (Fleck 2002). Dentro del mismo puede distinguirse en volumen "absoluto", representado por el total de kilómetros, repeticiones o kilogramos en una de esas etapas temporales (Fleck 2002) o el volumen "relativo", que sería la cantidad de trabajo realizado en un ciclo determinado en relación a la Capacidad Máxima Individual (Naclerio 2005), es decir, por ejemplo, los kilómetros semanales divididos por el máximo kilometraje semanal en una preparación o "macrociclo" (términos que se explican en el apartado 1.10).

Aunque la carga de entrenamiento de carrera pueda prescribirse por tiempo o distancia, creemos que, al igual que otros entrenadores como Daniels, en el caso de corredores de bajo nivel es preferible indicarla en tiempo, de cara a provocar efectos fisiológicos similares respecto a las cargas de corredores de mayor nivel. Como ejemplo, un corredor de alto nivel puede correr 30 kilómetros de forma suave en unas 2 horas. Pero para un corredor de bajo nivel 30 kilómetros sería alrededor de una hora más, con lo que la intensidad y el estrés fisiológicos cambian. Por ello, en corredores de bajo nivel parece más sensato prescribir el entrenamiento por tiempo y no por distancia.

Así mismo creemos que indicar las cargas de entrenamiento por tiempo y no distancia, al menos durante ciertos momentos de la temporada y ciertas sesiones, reduce la ansiedad por controlar en todo momento la velocidad o ritmo desarrollado, permitiendo centrarse en desarrollar una intensidad fisiológica constante si es ese el objetivo, ya sea por medio de la percepción o la FC.

Además, como indican Péronnet y colaboradores (2001), las sesiones de entrenamiento de baja intensidad son las únicas en las que los corredores de ciertas diferencias de nivel pueden coincidir, fomentando el aspecto social del entrenamiento, debido a que para unos la intensidad es tolerable durante cierto tiempo pese a no ser excesivamente

liviana, mientras que para los de mayor nivel puede rondar el límite inferior de intensidad necesaria y servir para complementar volumen de trabajo total semanal o la regeneración.

En pruebas cortas la utilidad del volumen se concibe como entrenamiento de base, mientras que en pruebas largas o ultramaratones gana en especificidad y se convierte en la principal variable de entrenamiento (Navarro y García-Verdugo 2003).

Para Bompa (1999), el incremento del volumen a lo largo de las temporadas es imprescindible para producir adaptaciones en los deportistas de elite, siendo la principal variable en los deportistas de resistencia. En el general de los deportes, este autor indica las cifras aproximadas de 400 horas anuales para alcanzar un buen nivel de carácter regional, 600 para un nivel nacional, 800 para un atleta de nivel internacional, y 1000 horas anuales de entrenamiento para un deportistas entre los 20 mejores del mundo. Aunque Bompa (1999) lo indica como recomendación para el general de los deportistas, también el entrenador noruego de esquiadores de fondo Eric Røste coincide en esa cifra límite para los esquiadores masculinos que aspiren a la elite, y marca cifras objetivo en función de la edad, siguiendo la progresión lineal que se observa siguiendo los puntos de la recta 1 de la figura 1.6.1 (Seiler 1997)

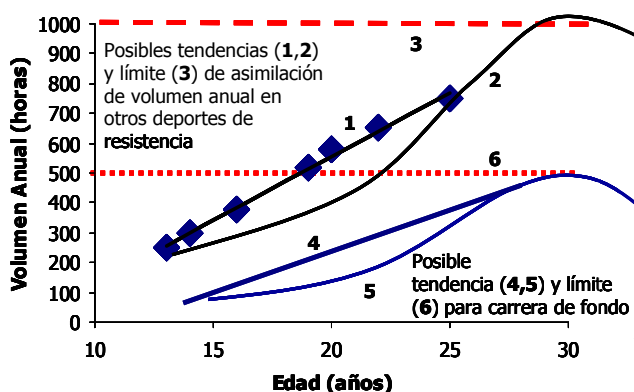
Pero es lógico que dichas cifras sean más útiles para ese deporte y otros como el ciclismo o el triatlón. Por ejemplo, un corredor de maratón de elite que recorriera unos 9000 kilómetros anuales, a una media de 3 min 45 s o 4 minutos el kilómetro, rondaría las 600 horas anuales, lo que supone una media anual de unos 160-180 kilómetros semanales. Un corredor que haga una media de 100 kilómetros semanales de media, con un período de transición y regeneraciones periódicas, rondaría las 300-350 horas anuales. Por ello quizá los datos de Platonov (2001) sean más reales para los corredores de fondo. Propone que en unos 10 años para alcanzar el máximo nivel, se acumularía un total de 2600 horas para el atleta de alto nivel y unas 5000 para el de elite. Esto, unido a los datos de la evolución de Paula Radcliffe (actual *recordwoman* de maratón) a lo

largo de su carrera deportiva (Jones 2006, Jones 1998), se traduciría en una progresión lineal desde unas 150 horas en la iniciación a unas 450 horas anuales o hasta unas 500 como límite, como se refleja en la parte inferior de la figura 1.6.1, que sintetiza todo ello.

La regla de los 10 años o las 10.000 horas (Ericsson y Charness 1994, Ericsson et al 1993, Bloom 1985) lógicamente asume que no se harán 1000 horas cada año, sino que serán menos al principio y más al final. En general se asume que la progresión es fundamental, tanto en la temporada como en la carrera deportiva, para provocar adaptaciones pero sin provocar lesiones (Péronnet y Thibault 2001, Bompa 1999).

Además, Navarro y García-Verdugo (2003) indican que a partir de cierta edad y nivel de rendimiento, el factor intensidad es el único que puede provocar mayores adaptaciones, pudiendo haber un leve descenso del volumen anual de entrenamiento (por ejemplo un ~5%). Esto también se refleja en la figura 1.6.1, tanto en las rectas 2 como 5, que muestran una tendencia no-lineal, sino inicialmente más exponencial, como también sugieren éstos y otros autores como otra posibilidad de incremento anual del volumen.

Figura 1.6.1
Incrementos del volumen anual de entrenamiento en deportistas de resistencia
A partir de datos de Røste (en Seiler 1997), Platonov (2001), Jones (2006,1998) y Navarro y García-Verdugo (2003)



Por tanto, parece existir un rango de volumen "óptimo" para inducir las adaptaciones funcionales y estructurales deseadas (Ostrowoki et al 1997, Kraemer, et al 1997). Aunque no parece fácil de

detectar, más allá del empirismo con cada atleta en particular, parece que éste depende del deporte, de la cualidad a desarrollar, de características individuales de los sujetos como el nivel de rendimiento, la edad y el sexo, del objetivo del entrenamiento (Desarrollo / Mantenimiento, etc) y el momento de la preparación, tanto en la temporada como en la carrera deportiva (Peterson *et al* 2004, Kraemer y Ratamess 2004, Wolfe 2004, Seiler 1997)

De hecho, empíricamente diversos corredores han indicado que sus mejores marcas no se lograron en las temporadas que más volumen acumularon (Noakes 2003). Esto también se puede aplicar al kilometraje máximo semanal de la temporada. Por ejemplo, el análisis de las mejores marcas en maratón de Ron Hill a lo largo de once años (1964-1975) y su kilometraje semanal, muestra que un entrenamiento alrededor de los 140-160 km semanales en los últimos 3 meses antes de cada maratón resultó óptimo para él, con picos máximos de 210-220, mientras que otras preparaciones con volúmenes superiores o inferiores le llevaron a peores marcas (Noakes 2003).

Para acumular un alto volumen, lógicamente es preciso desarrollarlo a una intensidad baja. La práctica de un mayoritario uso del entrenamiento de baja intensidad se observa en trabajos científicos de carácter descriptivo con alto nivel o elite en diversos deportes cíclicos de resistencia, como el ciclismo (Lucía *et al* 2000, Lucía *et al* 1999), el remo (Fiskestrand y Seiler 2004, Steinacker *et al* 1998), el esquí de fondo (Seiler y Kjerland 2004) o las pruebas de carrera como el maratón (Billat *et al* 2005) y el campo a través (Esteve-Lanao *et al* 2005).

La proporción se sitúa entre un 70 y 95% del tiempo total real de entrenamiento de la temporada o ciclo de preparación, variando en función del método de cuantificación empleado.

Al margen de beneficios en la fijación de la técnica correcta, argumento habitual en el caso de la natación (Maglischo 2003), ¿por qué mecanismo fisiológico es útil un alto volumen de entrenamiento en resistencia?

Un mecanismo especialmente provocado por el alto volumen de entrenamiento puede ser el incremento del volumen

plasmático, que provocará un incremento del retorno venoso, y con ello, por medio del mecanismo de Frank-Starling, un mayor bombeo cardíaco. De este modo se incrementa el aporte sanguíneo a los músculos, algo que parece clave para la mejora del VO_2max y por tanto del rendimiento en atletas entrenados. También es sabido que en los deportistas de resistencia las cavidades cardíacas son mayores que en el resto de deportistas, lo que puede deberse a ese mayor volumen de entrenamiento que les diferencia (Lucía 2005, Lucía *et al*/2000a, Lucía *et al*/2000b).

El entrenamiento de alto volumen puede mejorar la economía de las fibras, incluso sin modificar su tipología, por ejemplo manteniendo la mayor potencia de las fibras tipo II pero aportándoles ciertas características de las tipo I como la eficacia y eficiencia para consumir oxígeno, o la capilarización (Lucía *et al* 2000a).

El volumen de entrenamiento tiene también una utilidad mecánica por cuanto un limitante del progreso deportivo puede ser la falta de resistencia de articulaciones y ligamentos (Verjoshanski 1990).

Diversos autores coinciden en señalar una balanza de "beneficio-riesgo" entre el incremento del volumen y la mejora del rendimiento (Navarro y García-Verdugo 2003, Bompa 1999). Esto parece claro por cuanto un incremento súbito o un volumen excesivo pueden conducir a la lesión o el sobreentrenamiento.

Por el contrario, tal como se desarrolla posteriormente en los trabajos experimentales, parece también que la acumulación de volumen de entrenamiento a bajas intensidades, en su medida adecuada pero en una alta proporción respecto al resto de entrenamiento, puede servir como medio para tolerar mejor con posterioridad o paralelamente el entrenamiento de alta intensidad, y así evitar el sobreentrenamiento por regulación a la baja del sistema nervioso simpático (Esteve-Lanao *et al* 2007, Esteve-Lanao *et al* 2005, Seiler y Kjerland 2004, Lucía *et al* 2001b).

La mínima intensidad que se ha sugerido como útil para el entrenamiento de volumen ronda el 70-60% de la FC máx (Seiler 1997) o 65-70% de la Potencia Aeróbica Máxima (Péronnet *et al* 2003).

Intensidad

Del análisis del entrenamiento de los grandes corredores de fondo se desprenden dos aspectos comunes, ambos relacionados con la intensidad de entrenamiento. Por una parte, casi todos los grandes corredores de fondo obtuvieron éxitos previos en distancias más cortas. En segundo lugar, no siempre realizaron volúmenes enormes, pero todos incluyeron entrenamiento de alta intensidad en su entrenamiento (Noakes 1992)

La intensidad del entrenamiento es el componente cualitativo (Bompa 1999). La intensidad presenta más formas de expresión, que básicamente se agrupan en variables de intensidad fisiológica o interna (% VO_2max , Frecuencia Cardíaca o % de la FCmax, lactato o percepción de esfuerzo) y externas (velocidad o ritmo). En este sentido los entrenadores suelen utilizar la referencia de minutos por kilómetro, mientras que los investigadores suelen expresarla más habitualmente en metros por minuto, metros por segundo o kilómetros por hora.

Una referencia intermedia entre la potencia desarrollada y el significado fisiológico es utilizar porcentajes de la velocidad aeróbica máxima, siempre y cuando ésta también se identifique periódicamente.

Pero todos los medios para prescribir una intensidad en resistencia tienen sus limitaciones: la velocidad no es constante si el relieve, la superficie o la fatiga se modifican, por lo que el estrés fisiológico tampoco es constante. La FC puede verse afectada por la fatiga y todo lo relacionado con ella (hidratación, calor, sobreentrenamiento...), y se debe tener en cuenta su cinética de activación en los entrenamientos intermitentes por la interacción metabólica. El lactato no permite una monitorización en esfuerzo ni inmediata, como el VO_2 , y la percepción es así mismo relativa a la velocidad solo si la fatiga es pequeña, siendo quizá la más útil herramienta, si bien requiere de una experiencia notable.

En el entrenamiento corriente parece más sensato utilizar variables de control de la carga interna. Sin embargo, para evaluar periódicamente los progresos, o en los entrenamientos de "ritmo" durante la

preparación inminente para la competición objetivo, la referencia ritmo o velocidad cobran todo el protagonismo, aunque siga siendo útil relacionarlo con referencias fisiológicas. Al fin y al cabo, los triunfos y las marcas se ganan contra el tiempo.

Una cuestión clave en el entrenamiento de resistencia aeróbica es la de establecer las intensidades óptimas de entrenamiento. Como es de suponer, éstas deben ser distintas según el nivel de la población.

Se ha indicado recientemente que la diferencia principal estriba entre sujetos con valores de $VO_2\text{max}$ inferiores o superiores a $40 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Para aquellos con un nivel inferior, la mayor intensidad no parece especialmente necesaria, siendo la intensidad mínima para producir mejoras cualquier intensidad superior al 38% del $VO_2\text{max}$. Para sujetos de más de $40 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, el mínimo sería el 50% del $VO_2\text{max}$ (Swain y Franklin 2002). Y si bien no se ha determinado el óptimo para la máxima mejora, se cree que estará entre el 80 y el 100% del $VO_2\text{max}$ (Wenger y Bell 1986, Tabata *et al* 1997, Jones y Carter 2000, Billat 2001, Kubukeli *et al* 2002, Laursen y Jenkins 2002, Berg 2003).

Astrand y Rodahl, en su libro de texto de fisiología (1986) indicaron que "*Una cuestión importante pero por resolver es qué tipo de entrenamiento es más efectivo: mantener un nivel del 90% del $VO_2\text{max}$ durante 40 min o solicitar el 100% del $VO_2\text{max}$ durante 16 min*". Al poco tiempo Olsen y colaboradores (1988) trataron de responderles en un trabajo con 2 grupos de entrenamiento con intervalos, uno entrenando mayor volumen (2,5 a 3 millas) al 92% de $VO_2\text{max}$, y otro con menor volumen (1,5 a 2,5 milla) al 100%. Tanto el rendimiento como el $VO_2\text{max}$ fueron mejorados por igual en ambos grupos.

Actualmente conocer cuánto entrenamiento es necesario de cada intensidad es una de las más recientes tendencias en la investigación en el entrenamiento de la resistencia, especialmente en deportistas de alto nivel. Todo ello se profundiza en el apartado 1.10 y en los estudios de esta Tesis Doctoral.

Como se indicó anteriormente, el volumen parece beneficiar la función cardiovascular

por un incremento del volumen plasmático. Para retener adecuadamente estos 1-2 litros adicionales de plasma que se pueden llegar a obtener, el entrenamiento debe producir las adaptaciones de incrementar el diámetro de las arterias existentes, y formar nuevos vasos capilares alrededor de las fibras. Por ejemplo, un keniano de elite puede tener unos 6 capilares por fibra, mientras que un estudiante de Actividad Física y Deporte puede tener unos 4 por fibra (Saltin *et al* 1995). Esta capilarización parece estimularse con entrenamientos de cierta intensidad, alrededor de umbral anaeróbico (Navarro y García-Verdugo 2003), y la densidad mitocondrial a intensidades alrededor de $VO_2\text{max}$ (Terjung 1995). La capilarización es también necesaria para el tamponamiento del lactato, otra adaptación lógicamente propia del entrenamiento a intensidades elevadas o muy elevadas, más allá del $VO_2\text{max}$ (Péronnet *et al* 2001).

Así mismo parece que la intensidad es especialmente necesaria a nivel neuromuscular (Noakes 2003), es decir la resistencia muscular para mantener la contracción intensa de cada zancada en fatiga, así como la habilidad de modificar la frecuencia de ciclo, por ejemplo, en un cambio de ritmo, una cuesta o un esprint final.

Por tanto, parece que el volumen es imprescindible para un desarrollo central mientras que la intensidad lo es especialmente a nivel periférico, en el sistema cardiovascular, y en general en las habilidades neuromusculares, si bien el volumen también mejora las propiedades metabólicas de las fibras para una mejor economía.

Recuperación, densidad o frecuencia

No son términos sinónimos pero los presentamos de forma agrupada, pues se relacionan con la sucesión temporal de las cargas de entrenamiento. Un principio fundamental del entrenamiento es el de la regeneración periódica.

La frecuencia es el *número de sesiones en un período de tiempo*, habitualmente en el microciclo. La recuperación es el *tiempo de pausa entre estímulos*, y la densidad representa la frecuencia de estímulos de

entrenamiento por unidad de tiempo, es decir, un *cociente o proporción entre la duración del estímulo y la de la pausa* (Bompa 1999)

Todo ello permite llegar al compromiso óptimo entre la carga que supone una sesión y la obtención de su beneficio con posterioridad (supercompensación). La escasa recuperación conduce hacia la lesión o el sobreentrenamiento, mientras que su exceso al mantenimiento y posterior descenso del nivel de condición física. De ahí que la frecuencia de entrenamiento esté tan relacionada con la intensidad, a lo que hay que añadir que la intensidad es el elemento clave para mantener el nivel de condición física en caso de una menor frecuencia o dificultades para la continuidad, más que el volumen, a tenor de los efectos del desentrenamiento (Mújika y Padilla 2001, Mújika y Padilla 2000) como se ampliará posteriormente en el apartado 1.9.

La continuidad en el entrenamiento aeróbico es especialmente imprescindible, produciéndose palpables empeoramientos a partir de las dos semanas de cese de actividad, que habitualmente requieren de mayor tiempo para su restauración de nivel (Terjung 1995). Aunque la frecuencia mínima para el desarrollo de la salud es de 3 sesiones semanales, obteniéndose cambios menos drásticos a partir de 5 días por semana (ACSM 1998), la necesidad de generar altos volúmenes en corredores especializados les lleva a realizar de 6 a 12 sesiones semanales, buscando leves mejoras, que sin embargo pueden representar diferencias decisivas a nivel de rendimiento (Péronnet *et al* 2001, Bompa 1999).

Aunque algunos autores se empeñan en destacar la importancia preferente de intensidad o volumen, la recuperación es clave en el entrenamiento de resistencia, pues es precisamente su restricción lo que limita la tolerancia al esfuerzo.

Sin embargo, parece que los conocimientos en este campo son todavía uno de los retos de científicos y entrenadores. Tenemos bastante claro, por ejemplo, como identificar una intensidad de $VO_2\text{max}$, y en qué volumen entrenarlo, y sin embargo, cuando recomendamos una pausa de 1

min, tampoco está tan claro si debería ser mejor de 55, 50 o 42 segundos, pues así mismo depende de que dicha pausa sea pasiva o activa, y a qué intensidad en ese caso.

En el punto 1.7 se amplía la información al respecto de entrenamientos que se han demostrado científicamente útiles para el desarrollo de cada determinante del rendimiento y formas utilizadas por entrenadores para el diseño de cargas de entrenamiento, y en el punto 1.11 como controlar la evolución de las cargas y los progresos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ESTE APARTADO:

American College of Sports Medicine. Position Stand: The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:975-991.

Astrand PO, Rodahl K. Textbook of work physiology. New York: McGraw-Hill, pp 423-427, 1986.

Berg K. Endurance training and performance in runners. Research limitations and unanswered questions. *Sports Med* 2003;33:50-73.

Billat V. Interval training for performance: A scientific and empirical practice. Special recommendations for middle- and long-distance running. Part I: Aerobic Interval Training. *Sports Med* 2001;31:13-31.

Billat VL, Demarle A, Slawinski J, Paiva M, Koralzstein JP. Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:2089-2097.

Bloom, B. Developing Talent in Young People. New York: Ballantines, 1985.

Bompa T. Periodization: Theory and methodology of training. Human Kinetics, Champaign, IL 1999.

- Bompa T. Theory and methodology of training: the key to athletic performance, Kendall/Hunt Publishing Company 1994.
- Ericsson, K.A. and Charness, N. Expert Performance. Its Structure and Acquisition. *American Psychologist* 1994;725-747.
- Ericsson, K.A., Krampe, R.Th. and Tesch-Romer. The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review* 1993;100:363-406.
- Esteve-Lanao J, San Juan AF, Earnest CP, Foster C, Lucía A. How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Med Sci Sports Exerc* 2005;37:496-504.
- Fiskestrand A, Seiler KS. Training and performance characteristics among Norwegian international elite rowers 1970-2001. *Scand J Med Sci Sports* 2004;14:303-310.
- Fleck SJ (2002) EN: Kraemer WJ and Häkkinen K (Eds). *Strength training for sport* (Eds,) Blackwell Sciences, 55-67 ciudad.
- Fry AC. The Role of Training intensity in Resistance Exercise Overtraining and Overreaching EN: Kreider RB, Fry AC, O'Toole ML. Overtraining in Sport, Human Kinetics Champaign IL, 1998.
- Jones AM. The physiology of the World Record Holder for the Women's Marathon. *Int J Sports Sci and Coaching* 2006;1:101-116.
- Jones AM, Carter H. The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. *Sports Med* 2000;29:373-386.
- Jones AM. A five year physiological case study of an Olympic runner. *Br J Sports Med* 1998;32:39-43.
- Kramer JB, Stone MH, O'Bryant H, Conley MS, Johnson RL, Nieman DC, Honeycutt DR, Hoke TP. Effects of single Vs multiple Ss of weight training: impact of Volume and intensity. *J Strength Cond Res* 1997;11:143-147.
- Kraemer WJ, Ratamess NA. Fundamentals of Resistance Training Progression and Exercise Prescription, *Med Sci Sports Exerc* 2004;36:674-688.
- Kubukeli ZN, Noakes TD, Dennis SC. Training techniques to improve endurance exercise performances. *Sports Med* 2002;32:489-509.
- Laursen PB, Jenkins DG. The scientific basis for high-intensity interval training. Optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med* 2002;32:53-73.
- Lucía A. Perspectives on high volume training in middle distance athletes. *USSF Coaches Seminar* 2005.
- Lucía A, Diaz B, Hoyos J, Fernández C, Villa G, Bandrés F, Chicharro JL. Hormone levels of world class cyclists during the Tour of Spain stage race. *Br J Sports Med* 2001;35:424-430.
- Lucia A, Hoyos J, Pardo J, Chicharro JL. Metabolic and neuromuscular adaptations to endurance training in professional cyclists: a longitudinal study. *Jpn J Physiol* 2000a;50:381-388.
- Lucia A, Hoyos J, Perez M, Chicharro JL. Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med Sci Sports Exerc* 2000b;32:1777-1782.
- Lucía A, Hoyos J, Carvajal A, Chicharro JL. Heart rate response to professional road cycling: The Tour de France. *Int J Sports Med* 1999;20:167-172.
- Maglischo EW. Swimming Fastest. Human Kinetics, Champaign IL, ed 2003.
- Mújika I, Padilla S. Cardiorespiratory and metabolic characteristics of detraining in humans. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:413-421.
- Mújika I, Padilla S. Detraining: Loss of training-induced physiological and performance adaptations. Part I. *Sports Med* 2000;30:79-87.
- Naclerio AF. EN: Jiménez A (ed) Entrenamiento personal, bases

fundamentos y aplicaciones, pp 87-133, INDE Barcelona 2005.

Navarro F, García-Verdugo M. Apuntes Máster en Alto Rendimiento Deportivo UAM-COES, módulo 2.5. , capítulo 1, pp 2-3, 2003.

Noakes T. Lore of Running (4^aed). Human Kinetics, Champaign-IL, 2003.

Noakes T. Lore of Running (3^a ed). Oxford University Press, Oxford, 1992.

Olsen R, Berg K, Latin R, Blanke D. Comparison of two intense interval training programs on maximum oxygen uptake and running performance. *J Sports Med Phys Fitness* 1988;28:158-164.

Ostrowoki KJ, Wilson GJ, Weatherby R, Murphy PW, Lyttle AD 1997) The effect of weight training volume on hormonal Output and muscular Size and function. *J Strength Cond Res* 1997;11:148-154.

Péronnet F (coord) Maratón. INDE, Barcelona 2001.

Peterson MD, Rhea MR, Alvar BA. Maximizing strength development in athletes: A meta-analysis to determine the dose response relationship. *J Strength Cond Res* 2004;18:377-382.

RØste E., EN: Seiler S. XC Endurance Training Theory- Norwegian Style. <http://home.hia.no/~stephens/index.html> 1997.

Saltin B, Kim CK, Terrados N, Larsen H, Svedenhag J, Rolf CJ. Morphology, enzyme activities and buffer capacity in leg muscles of Kenyan and Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports* 1995;5:222-230.

Seiler KS, Kjerland GØ. Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an "optimal" distribution?. *Scand J Med Sci Sports* 2006;16:49-56.

Seiler S. XC Endurance Training Theory- Norwegian Style. 1997. <http://home.hia.no/~stephens/index.html>

Steinacker JM, Lormes W, Lehmann M, Altenburg D. Training of rowers before

world championships. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:1158-1163.

Swain DP, Franklin BA. VO2 reserve and the minimal intensity for improving cardiorespiratory fitness. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:152-157.

Tabata I, Irisawa K, Kouzaki M. Metabolic profile of high-intensity intermittent exercises. *Med Sci Sports Exerc* 1997;29:390-395.

Terjung RL. Muscle adaptations to endurance training. *Gatorade Science Sports Institute* 8, 1995.

Verjoshanski I. Entrenamiento Deportivo, pp 95-98, Martínez Roca, Barcelona 1990.

Wenger HA, Bell GJ. The interaction of intensity, frequency and duration of exercise training in altering cardiorespiratory fitness. *Sports Med* 1986;3:346-356.

Wolfe BL, LeMura LM, Cole PJ. Quantitative Analysis of Single- Vs Multiple Set Programs in Resistance Training. *J Strength Cond Res* 2004;18:35-47.

1.7.- El Entrenamiento de los Factores Determinantes del Rendimiento

En el apartado 1.2 se identificaron los factores determinantes del rendimiento. En el presente apartado exponemos de qué manera entrenarlos. Además, en otros puntos se han dado referencias históricas sobre investigación y entrenamiento (apartado 1.4), y se han diferenciado las necesidades de entrenamiento de población más o menos entrenada (apartado 1.6).

Tampoco es motivo de este apartado exponer los métodos de entrenamiento que actualmente utilizan los entrenadores, y que el lector puede hallar con facilidad en los manuales técnicos.

Por todo ello, en el presente apartado nos limitaremos a mostrar qué tipo de entrenamientos han demostrado especial utilidad en el desarrollo del $VO_2\max$, el Umbral Anaeróbico, la Economía o la Capacidad y Potencia Anaeróbica.

Sin embargo, es preciso aclarar ciertos términos. Como vimos en el apartado 1.4., pese a que el entrenamiento continuo supuso durante muchos años la principal forma de entrenamiento, de cara a preparar distancias relativamente cortas o acumular trabajo a alta intensidad, es preciso utilizar entrenamientos fraccionados. En este sentido indicamos a continuación ciertas consideraciones sobre la terminología:

En cuanto a la "duración" de los esfuerzos, éstos oscilan comúnmente entre los 10 s y los 10 min, siendo así por algunos autores divididos los métodos en "cortos", "medios", "largos".

En cuanto a la "intensidad", lógicamente gracias al intervalo puede ser mayor si nos centramos en la intensidad media de los tramos de esfuerzo.

Otra cosa es la intensidad media de sesión, contabilizando los tramos de pausa, pues en función de la duración y proporción de ésta respecto a los tramos intensos la intensidad media total puede ser claramente distinta.

Los métodos son llamados por los entrenadores "extensivos" (menor intensidad y mayor volumen) o bien "intensivos" (lo contrario).

El "intervalo" es llamado por los entrenadores o bien "pausa" cuando la orientación es que sea incompleta o bien "recuperación" cuando pretende ser de una mayor duración y una orientación de recuperación "completa". Para ello no solo la duración de la misma es importante sino también la proporción respecto a la duración de los tramos intensos. Dicha proporción es llamada *ratio*, y se indica en proporciones del tipo 1:1, 2:1, etc, siendo el primero en referencia a duración y el segundo al intervalo de descanso. El intervalo puede basarse en tiempo, potencia o velocidad pero también hasta descender a un % de la FC máxima, y puede ser activo o pasivo.

Otro concepto de proporciones es la "amplitud" del intervalo, que es la proporción entre la diferencia de intensidades de trabajo y recuperación respecto a la intensidad media. Como ejemplo, si la Intensidad es del 100% $VO_2\max$ y la recuperación del 60% $VO_2\max$ con un ratio 1:1 (por ejemplo, 1 min / 1 min), entonces la diferencia de intensidades es 100-60 y la intensidad media es $((1 \times 100) + (1 \times 60)) / 2$. La llamada amplitud, será la de 40 x 100 dividido entre 80, lo que es igual a 50. La amplitud se diría que es del 50%. Para practicar los cálculos, el lector puede verificar que si el entrenamiento fuera a intensidad del 90% $VO_2\max$ y recuperación del 50% $VO_2\max$ con un ratio 2:1 (por ejemplo, 1 min / 30 s), entonces amplitud sería del 52% (Billat 2001).

También es utilizado el término "entrenamiento intermitente" por algunos autores como sinónimo, y en Francia por algunos entrenadores de atletismo como un tipo de circuito de fuerza-resistencia con duraciones de esfuerzo e intervalo muy breves (15 a 25 s) (Gacon 1990). Habitualmente, en el entrenamiento deportivo, se refiere a entrenamientos por intervalos con muy poca duración de trabajo y de pausa, con ratios cercanos a 1:1 Sin embargo, otros autores en el campo de la salud utilizan el término "intermitente" como esfuerzos separados a lo largo del día (Peterson *et al* 2004).

Exponemos a continuación los principales entrenamientos que se han estudiado para el desarrollo de los factores determinantes del rendimiento.

VO₂max

Ya hemos indicado, al respecto de la intensidad, en el apartado 1.6, que en población no entrenada y con bajo nivel de fitness no es necesario el desarrollo de intensidades superiores al 50% de VO₂max para obtener mejoras (Swain y Franklin 2002), mientras que en población entrenada hay que acercarse al menos al 80% del mismo.

Como ya se indicó en el apartado anterior Astrand y Rodahl (1986) indicaron que *"Una cuestión importante pero por resolver es qué tipo de entrenamiento es más efectivo: mantener un nivel del 90% del VO₂ max durante 40 min o solicitar el 100% del VO₂ durante 16 min"*. Al poco tiempo Olsen y colaboradores (1988) trataron de responderles en un trabajo con 2 grupos de entrenamiento con intervalos, uno entrenando mayor volumen (2,5 a 3 millas) al 92% de VO₂max, y otro con menor volumen (1,5 a 2,5 millas) al 100%. Tanto el rendimiento como el VO₂max fueron mejorados por igual en ambos grupos. Ciertamente, tal como veremos, la cuestión sigue en el aire, aunque no es creíble que el 100% del VO₂max se pueda mantener 16 min, y parece que acumular mucho entrenamiento alrededor del 95% sería lo óptimo para los muy entrenados.

Vayamos por partes. Parece que cuanto menor sea la amplitud, mejor. Un elegante trabajo de Billat y colaboradores (2001) demostró que los ejercicios de baja amplitud (35% o menos) permiten pasar mucho más tiempo a alta intensidad fisiológica que los ejercicios con alta amplitud. Compararon 3 tipos de entrenamiento: A- 15 s /15 s al 90/80% de la velocidad de VO₂max o vVO₂max, amplitud del 11%, B- 15 s /15 s al 100/70% vVO₂ max, amplitud del 35%, y C- 15 s /15 s al 110/60% vVO₂max, amplitud del 59%. Hallaron que aunque los 3 entrenamientos, hechos hasta la extenuación, permiten alcanzar similares máximos VO₂, A y B permitieron emplear el doble de tiempo a VO₂max que C (14 vs 7 min), con menor acumulación de lactato en sangre (A y B 9 mMol·L⁻¹ frente a 11 mMol·L⁻¹ de C).

Las ventajas del entrenamiento con intervalos de máxima intensidad aeróbica radican no solo en la baja amplitud sino

también en las pausas breves y activas. Si la pausa y la duración son breves (ejemplos: 15/15, 30/30...), la mayor contribución porcentual en cada tanda de la mioglobina así como la contribución inicial de la fosfocreatina (PC) preservan del agotamiento de glucógeno y con ello de la acumulación de lactato. Ya en 1978, Essen y colaboradores hallaron menor depleción de glucógeno y en las fibras tipo II y menor acumulación de lactato en un entrenamiento a VO₂max de 15/15 que en un esfuerzo continuo hasta la extenuación a vVO₂max.

Si la pausa es breve y además activa, se mantiene elevado el VO₂ (y la FC), con lo que se disminuye el déficit acumulado de O₂ (es decir, la contribución anaeróbica glucolítica).

Así mismo se estimula el aclarado de lactato manteniéndolo en niveles relativamente estables. Billat y colaboradores (2000) valoraron que el 83% del tiempo se permanecía en VO₂max realizando 30 s al 100% de vVO₂max y 30 s al 50% de vVO₂max, y pese a que el lactato medio fue de 7 mMol·L⁻¹, durante 3 min se mantuvo en 4 mMol·L⁻¹ pese a estar ya en VO₂max. Ya previamente Gorostiaga y colaboradores (1991) habían utilizado ya el entrenamiento de 30 s 100% a intensidad de vVO₂max / 30 s de pausa, si bien con descanso pasivo. Lo compararon con el ejercicio continuo de la misma duración a la misma intensidad media (50% VO₂max). Observaron que cada tipo de ejercicio daba lugar a un tipo de mejoras, el interválico a mejoras de VO₂max y de potencia máxima aeróbica y el continuo de menor acumulación de lactato y de mayor capacidad oxidativa.

Lógicamente esas son las ventajas propias de cada tipo de esfuerzo, especialmente por la intensidad desarrollada, pues hay que tener en cuenta que globalmente igualar una intensidad media sobre un mismo tiempo total puede no suponer la misma carga de entrenamiento. Puesto que el esfuerzo de alta intensidad debe ser de corta duración, y la pausa aunque sea breve permite largo tiempo hasta la extenuación, estos entrenamientos permiten pasar más tiempo a alta intensidad, mayor tiempo a alta velocidad, mayor velocidad media de esfuerzo, y mayor velocidad media de sesión que el

trabajo continuo, incluso con ratios 2:1 (Billat *et al*/2000, Demarie *et al*/2000).

La mejor respuesta del entrenamiento con intervalos en personas moderada o altamente entrenadas es pues clara. Lógicamente, las adaptaciones derivadas de su aplicación crónica también debieran ser mejores que con el entrenamiento continuo. Sin embargo, diversos trabajos realizados sobre 5-8 semanas de duración, ya desde los años setenta, no han hallado un mayor efecto del método interválico de más intensidad respecto al continuo en personas tanto no entrenadas como moderadamente entrenadas (Gaesser y Wilson 1988, Cunningham *et al* 1979, Gregory 1979, Moffatt *et al* 1977, Eddy *et al* 1977). Esto quizá sea por lo indicado al respecto de la menor dependencia de intensidad en personas no muy entrenadas.

En sujetos relativamente entrenados, es fácil, con los métodos actuales de entrenamiento, estresar el sistema cardiorrespiratorio cercano a su VO_2 max. Eso ocurre incluso asumiendo que tienen menores prestaciones a nivel de potencia muscular. Por ejemplo, si medimos la frecuencia cardiaca (FC), alcanzan niveles iguales o muy cercanos la FC máxima (FCmáx). Uno de los entrenamientos que han demostrado solicitar dicho estrés, además de los intermitentes anteriormente indicados, han sido las repeticiones de 1 min a 2 min a VO_2 max o potencia pico con pausas en ratios 1:1 a 1:2 en ciclistas o corredores (Laursen *et al* 2003, Vuorimaa *et al* 2000), mostrando respuestas y beneficios particulares fruto del incremento de duración y pausa al doble. También se ha sugerido el uso del 50% del tiempo límite en VAM como duración de intervalo para el desarrollo de la VAM, indicándose que se pueden realizar 5 repeticiones a esa duración con una pausa activa del mismo tiempo (Billat 2002). Clásicamente, se propuso realizar 5x3 min al 90% de la VAM con pausa activa, también en proporción 1:1 (Åstrand 1960, citado por Billat 2002). Todos estos métodos se muestran en la figura 1.7.1 en referencia a atletas de "medio nivel".

Sin embargo, la situación en sujetos muy entrenados está por resolver porque parece aceptado que el entrenamiento actual por intervalos incide en estos sujetos solamente sobre factores periféricos, ya sean cardiorrespiratorios o de potencia muscular.

Por ejemplo, la FCmáx queda muy lejos de alcanzarse, aunque entrenen su VAM durante más repeticiones, que además es muy superior a la de los de menor nivel.

Los principales expertos hablan de la necesidad de incidir, en estos deportistas, sobre el factor central cardiorrespiratorio (y, porqué no, también el nervioso).

Para ello se han propuesto opciones como entrenar con el cuerpo tendido supino con el tronco más bajo que las piernas en ciclismo o maximizar la expansión del plasma por entrenamiento de volumen y o métodos artificiales no prohibidos.

La clave está en mejorar la capacidad de bombeo del corazón y la cantidad de oxígeno en sangre. Ya se han indicado las ventajas del entrenamiento de volumen al respecto del primer aspecto, en cuanto al volumen plasmático y tamaño cardiaco (apartado 1.6). En cuanto a la mejora de la cantidad de oxígeno en sangre, parece que los medios artificiales ilegales son muy efectivos, y que el entrenamiento en altura u otras tentativas no son tan eficaces. En este sentido, por tanto, para mejorar la VAM por medios naturales, solo quedaría mejorar la economía.

Figura 1.7.1

Tipos de entrenamiento estudiados científicamente que muestran especial eficacia para la mejora de la Potencia Aeróbica Máxima

Muy Bajo Nivel: cualquier intensidad superior al 50% de VAM (no acercarse al 85-90% de VAM o FCmáx)

Bajo Nivel: mínimo 70% de la VAM (no necesario superar 90% de VAM o FCmáx)

Medio Nivel:

- 15 s / 15 s al 90/80% de la VAM ó al 100/70% de la VAM (Billat *et al* 2001b, Essen *et al* 1978)
- 30 s / 30 s al 100/50% de la VAM (Gorostiaga *et al* 1991, Billat *et al* 2000)),
- 1 min / 1 min al 100% de la VAM / rec activa ó 2 min / 2 min al 100% de la VAM / rec activa (Laursen *et al* 2002ab, Vuorimaa *et al* 2000) (entre 7 y 14 reps)

Alto Nivel o Élite:

- 5x3 min al 90% de la VAM Rec=3 min al 30-40% de la VAM (Åstrand 1960)
- 5x50%Tlímite a VAM rec= el mismo tiempo al 60% de la VAM (Billat *et al* 1996)
- 4x4 min al 95% de la FC máx o VO_2 max en cuesta de una pendiente del 4-5% Rec 3 min con sensación de poder seguir 1 min más en cada repetición y una repetición más en cada entrenamiento (Hoff y Helgerud 2004 y Hoff 2006)

(en los casos en los que no se indique el número de repeticiones, parece que lo óptimo es hacerlo hasta no poder mantener dicha intensidad)

Una alternativa natural para la mejora del $VO_2\text{max}$, aparentemente demostrada científicamente, la proponen Hoff y Helgerud (2004), con bloques periódicos de gran densidad de estímulos cercanos al $VO_2\text{max}$. Hoff (2006) remarca que esto solo es tolerable por fondistas de cierto nivel, alrededor de los $70 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, con una base previa de entrenamiento tradicional de volumen. A partir de ahí propone bloques de 3 semanas con los siguientes entrenamientos como únicos contenidos: en resistencia, 4 repeticiones de 4 min alcanzando el 95% de la $FC\text{max}$, en un terreno cuesta arriba de alrededor del 4% de pendiente, y pausas de 3 min. Al finalizar cada repetición el corredor debería tener sensación de haber podido seguir 1 min más dicha repetición, y al final de la sesión manifestar la sensación de poder realizar una repetición (que no se hace). En fuerza, sesiones de 4 series de 4 repeticiones cercanas al fallo (90% de 1RM) en $\frac{1}{2}$ sentadilla, a 90° de flexión de rodilla, con recuperación amplia, para desarrollar la fuerza máxima y con ello la economía. La figura 1.7.2 muestra la organización de este tipo de bloque, que se aplica puntualmente, donde "2" significa 2 sesiones diarias del "4x4" de resistencia, y se observa que durante 3 semanas repiten un ciclo de 4 días "2-1-2-0".

Figura 1.7.2

Propuesta de entrenamiento de Hoff para el desarrollo de la VAM

L	M	X	J	V	S	D
2	1	2	-	2	1	2
-	2	1	2	-	2	1
2	-	2	1	2	-	2

"2" significa 2 sesiones diarias, "1", 1 sesión diaria y "-" descanso total. Se añade en esos días o en los días "1" 1 sesión semanal de 4x2-4 repeticiones con carga de 4RM en $\frac{1}{2}$ squat a 90° de flexión de rodilla.

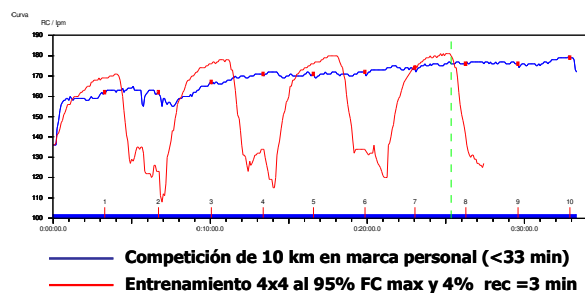
Con ello indican mejoras del $VO_2 \text{max}$ del 0,25% por cada sesión (lo que sería un ~6% al final de un ciclo de 3 semanas (Hoff 2006), que aunque no llegan al ~10% observado con los tratamientos con EPO, sí representaría una gran mejora puesto que la concepción clásica es que llegado cierto

nivel de $VO_2\text{max}$, éste ya no va a mejorar más). En el apartado 1.10 se amplía la información al respecto de la periodización al "estilo Hoff".

Por nuestra escasa experiencia en la aplicación de este método podemos asegurar, de momento, que la ejecución de este entrenamiento solicita una gran respuesta cardiovascular en los corredores de alto nivel, como ningún otro método. Como ejemplo, la figura 1.7.3 muestra que el "4x4" exige mayor FC que en una prueba de 10km, donde se supone que la activación de la FC ronda el 92% de promedio y el 99-100% de pico, incluso siendo una competición donde el corredor estableció su marca personal.

Figura 1.7.3

Respuesta de la FC en un mismo corredor de alto nivel a una competición de 10km estableciendo marca personal y en un entrenamiento previo de "4x4"



Umbral anaeróbico

Retomando la cuestión de si es mejor el entrenamiento continuo o con intervalos, pero en este caso en corredores entrenados, varios trabajos sin grupo control no llegan a aclarar qué es mejor. Mikesell y Dudley (1984), estudiaron a corredores con entrenamiento continuo 6 días a la semana de los que 3 días eran de trabajo intenso. Mejoraron la marca en carrera de 10 km de 38 min 34 s a 37 min 13 s, un 3,5%. Pero también la mezcla de entrenamiento continuo con entrenamiento con intervalos 6 días a la semana de los que 3 eran de intensidad y en sujetos de mayor nivel (Acevedo y Goldfarb, 1988), dio lugar a mejoras notables en la marca de 10 km, de 35 min 27 s a 34 min 24 s, un 3%. Habida cuenta de la menor mejora

conforme el nivel es mayor, no está claro por esta comparativa qué es preferible.

Además, en deportistas de resistencia, lógicamente el entrenar con intervalos y repeticiones breves, utilizando un metabolismo claramente distinto al de competición, es cuestionable como estímulo único y específico.

Por ello, al respecto de la intensidad óptima, en deportistas de competición parece que los estudios realizados con intervalos cercanos al ritmo de competición sí han hallado mejoras en el rendimiento, siendo pues este hecho clave. Estos estudios se ha hecho habitualmente es ciclistas, con entrenamientos a intensidades alrededor del umbral anaeróbico. Un trabajo de Stepto y colaboradores (1999), mostró, por ejemplo, que las mejoras se obtenían con el entrenamiento de 8x4 min al 85% de la potencia pico en test progresivo (PPO), que era la intensidad más similar a la desarrollada en la prueba utilizada para valorar el rendimiento (40 km contrarreloj), pero no con 12x1 min al 100%, 12x2 min al 90% o 4x8 min al 80%. Ese tipo de entrenamiento ha mostrado reiteradamente beneficios, habitualmente con población ciclista de cierto nivel. El mismo grupo de investigación siguió trabajando con la carga de 8x5 min al 86% del VO_2 pico con rec=1 min (Stepto *et al* 2001), y otros trabajaron con cargas iguales o similares hallando mejoras en tiempo a extenuación o tiempo en 40 km (Laursen *et al* 2002, Westgarth-Taylor *et al* 1997, Weston *et al* 1997, Lindsay *et al* 1996). Sorprendentemente también en 40 km mejoraban haciendo 12 sprints de 30 s al 175%, quizá por mecanismos relacionados con el metabolismo glucolítico anaeróbico y la potencia muscular (Stepto *et al* 1999, Laursen *et al* 2002). También en corredores se han mostrado los beneficios del ratio 5:1 en intensidades muy cercanas a la competición (de 5 km) con diversas combinaciones de trabajo e intervalo, mostrando similares beneficios (Babineau y Leger 1997).

Estas evidencias, junto a la noción de que la carga de trabajo correspondiente al umbral anaeróbico puede mantenerse en sujetos muy bien entrenados alrededor de una hora, (como se indicó en el apartado 1.2), sugieren que tanto entrenamientos continuos a intensidad ligeramente inferior como a esa intensidad por duraciones de

30-45 min, o entrenamientos fraccionados que acumulen 40-50 min a dicha intensidad, pueden ser estímulos óptimos para su desarrollo en corredores de alto nivel (Esteve-Lanao 2007a, Billat 2002, Péronnet *et al* 2001).

Economía de carrera

La economía de carrera viene determinada por muchos aspectos. Trabajos con corredores africanos con caucásicos muestran que las variables antropométricas son determinantes (Lucía *et al* 2006, Larsen *et al* 2004, Weston *et al* 2000, Saltin *et al* 1995, Coetzer *et al* 1993). Tal como se recomendó en el apartado 1.2, Saunders sintetizó todos los aspectos que afectan a la economía de carrera en una revisión publicada en 2004. En este apartado nos centraremos en aquellos que pueden verse afectados por el entrenamiento. Como indica dicho autor, estos serían: el momento de la temporada, el entrenamiento de fuerza con sobrecargas, el entrenamiento en cuestas, la pliometría, el entrenamiento de alta intensidad, y el volumen de entrenamiento.

En este sentido, en el apartado 1.6 ya hemos explicado que tradicionalmente se ha indicado que el entrenamiento de volumen de baja intensidad puede beneficiar el perfil metabólico de las fibras musculares, hacia fibras más eficientes energéticamente. Este efecto de evitar o retrasar un reclutamiento de más fibras rápidas menos eficientes se indicó en el apartado 1.2 al respecto de las mejoras en la fuerza máxima. Se ha sugerido que sería un menor número de fibras las que deberían activarse al pasar éstas a ser más fuertes y más coordinadas (Hoff *et al* 1999, Tanaka y Swensen 1998), o que al reducirse el % de fuerza máxima solicitado para un mismo nivel de tensión requerido, pasarían a participar más fibras lentas, más eficientes en cuanto al consumo aeróbico (Millet *et al* 2002).

Desde un punto de vista teórico, este planteamiento es irrefutable, pero autores como Zatsiorski (1995) lo han criticado en esfuerzos que requieren una sollicitación de la fuerza máxima inferior al 20%, que es el caso de las carreras de fondo, de modo que dicha influencia ventajosa para sobrecargas

altas o medias podría difuminarse en las sobrecargas muy bajas.

El trabajo propuesto por Hoff, anteriormente descrito, muestra mejoras del 1-2% en fuerza por cada sesión de entrenamiento, que se traducen en un 0,125 a 0,25% de mejora en la economía por cada sesión de fuerza (Hoff 2006).

Entrenadores como Fernando Lozano (entrenador de Chema Martínez) lo utilizan habitualmente de forma similar a la cargas propuestas por Hoff (~ 90% 1RM), si bien con otros ejercicios, como la cargada, además de realizar transferencias a trabajos de pliometría, arrastres, lastres y cuestas (Lozano 2006).

Cierto es, sin embargo, que en el caso de Hoff dicho bloque de entrenamiento comporta muchos minutos cuesta arriba a intensidades cercanas al VO_2max . Por ello, no hay que olvidar la gran carga de entrenamiento de fuerza resistencia específica, más inusual, si cabe, que la gran concentración de entrenamiento intenso, que nos lleva al otro mecanismo por el que la fuerza mejoraría la economía: la mejora de la rigidez músculo-tendinosa (llamada "stiffness"). Esto puede lograrse tanto con las cuestas como el entrenamiento de pliometría. Como muestra del entrenamiento de pliometría realizado en los estudios, Spurrs y colaboradores (2003) detallan su periodización de entrenamiento de pliometría de 3 sesiones semanales durante 6 semanas. Realizaban de 60 a 180 contactos, siendo los ejercicios inicialmente squat jumps, saltos en split, saltos a pies juntos y saltos alternos, para más adelante realizar saltos a una pierna, saltos en caída, saltos a pies juntos sobre vallas, y saltos a una pierna sobre vallas.

Por su parte, Paavolainen y colaboradores (1999) realizaban de 30 a 200 contactos con saltos alternos, contramovimientos a dos pies, saltos en caída y saltos sobre vallas, y saltos a una pierna con o sin sobrecarga de una barra, aparte de otros ejercicios de fuerza explosiva con sobrecargas sin salto.

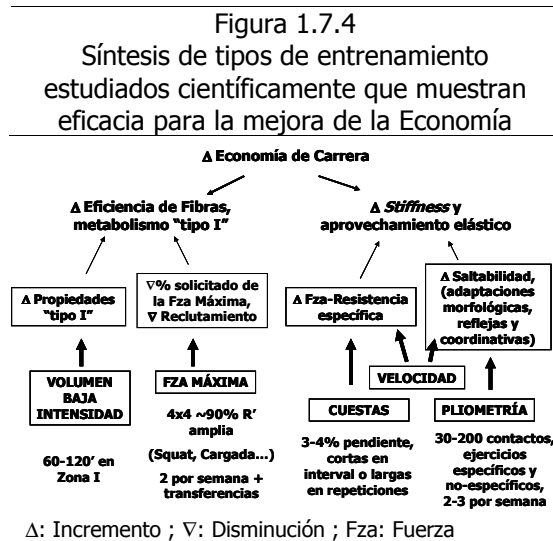
Pero nuevamente parece que planean dudas sobre la efectividad del tipo de ejercicios y su especificidad. Recientemente, Toumi *et al* (2004) reflexionaron que los investigadores al respecto de la pliometría parecen agrupables en 2 bandos: los que ven la

necesidad de emplear ejercicios específicos y los que no ven tal necesidad.

Curiosamente, un trabajo de Turner y colaboradores (1999) con corredores populares que halló mejoras en la economía con entrenamiento adicional pliométrico respecto a un grupo control, no halló mejoras en los tests de salto.

Pero en nuestra opinión, por las reflexiones sobre tipo de manifestación de fuerza a desarrollar, pero sobretodo por motivos relacionados con adaptaciones arquitectónicas específicas (Abe *et al* 2000, Full y Farley 2000, Herzog 2000), creemos que en general los beneficios del entrenamiento de fuerza pasan porque complementan a la especificidad del gesto de carrera. Esto podría ser con medios específicos, o con el ejercicio auxiliar y su transferencia a medios específicos como cuestas, lastres, velocidad, capacidad glucolítica o carrera en fatiga en general, que provocan adaptaciones específicas para el gesto de carrera. Un nivel bajo de fuerza o un nivel bajo de rendimiento en resistencia justificarían el porqué entrenamientos inespecíficos también pueden mejorar el rendimiento (Esteve-Lanao 2007b).

La figura 1.7.4 sintetiza el efecto de los diversos tipos de entrenamiento que pueden mejorar la economía, así como ejemplos de cargas de entrenamiento empleadas en los estudios.

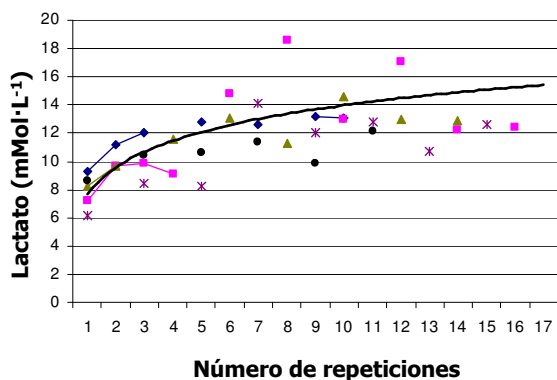


Capacidad anaeróbica

En esfuerzos superiores a la VAM, la acidosis metabólica puede llevar el pH en sangre arterial a descender hasta 7.1 y en el músculo hacia 6.6 (Sahlin *et al* 1976, Hermansen y Osnes 1972). La tolerancia a ello es claramente entrenable (Platonov 2001).

La figura 1.7.5 muestra datos de un entrenamiento de capacidad anaeróbica glucolítica de nuestros corredores, con repeticiones de 300 metros al 85% de la marca personal, hasta la incapacidad para cumplir el tiempo marcado (Esteve-Lanao 2007a). Como puede observarse, los niveles de lactato en sangre capilar aumentan hasta niveles alrededor de los 12 mMol·L⁻¹, que dichos corredores mantienen en sangre de forma reiterada durante 30-50 min (10-16 repeticiones).

Figura 1.7.5
Mediciones de lactato final cada 2 repeticiones de 300m al 85% de la marca personal, hasta el rechazo, en corredores de alto nivel



La figura 1.7.6 muestra un sencillo experimento realizado en nuestro laboratorio con mediciones pre y post a una carrera de campo a través de 7,9 kms con terreno ondulado y embarrado. Se pretendía medir a corredores que, esforzándose al máximo, llegasen en posiciones y tiempos más o menos equidistantes entre los 93 participantes.

Como puede observarse, la tendencia del lactato pico a los 3 min de la llegada es de disminuir conforme el nivel es menor, lo que se corresponde con que los mejores corredores toleran menores pH. La excepción la conforma el corredor del puesto 55, que posiblemente tenga unas

características metabólicas más glucolíticas de lo habitual para corredores de su nivel (quizá unos 7 mMol·L⁻¹ y pH de 7,30).

Figura 1.7.6
Mediciones de LA y pH post-competición de campo a través en corredores de distinto nivel

CORREDOR (puesto)	LA final (mMol·L ⁻¹)	pH Final	ritmo promedio (min/km)
A (3)	11,35	7,13	3:20
B (25)	9,08	7,24	3:44
C (36)	8,89	7,21	3:52
D (55)	9,87	7,18	4:14
E (74)	5,91	7,34	4:50
F (85)	3,94	7,38	5:31

(93 corredores terminaron la prueba, de 7,9 kms)

El entrenamiento de la capacidad anaeróbica (glucolítica) tiene la limitación de que el control de la intensidad debe realizarse exclusivamente por medio de la velocidad, al no existir fronteras fisiológicas como en la función aeróbica.

Debido a la acumulación del lactato y la imposibilidad en la práctica diaria de monitorizarlo en cada esfuerzo, una forma de establecer zonas de entrenamiento es calcular porcentajes supramáximos de la VAM. Habitualmente se utilizan intensidades alrededor del 105-120% de la VAM (Billat 2002, Péronnet *et al* 2001) (figura 1.7.7a).

Otro método es calcular porcentajes de marcas en la distancia de las repeticiones del entrenamiento, siendo las distancias utilizadas entre 200 y 500 metros habitualmente, y hasta un máximo de 1000 metros. El problema ahí es que debe calcularse la marca personal en ese momento para dicha distancia, por lo que habrá que haber hecho un test en días previos sobre la misma u otra similar desde la que estimarlo. Por el contrario, con los % de la VAM basta con el test VAM para poder identificar también zonas anaeróbicas. Pero dado que muchos entrenadores no realizan evaluaciones de la VAM, todavía es muy común el uso de tiempos basados en porcentajes de la marca.

Lo que no es adecuado es basarse en la distancia de competición para programar otras distancias, pues como se observa en la figura 1.7.7b, hay gran diferencias entre el porcentaje de la VAM solicitado y el % de

una marca según la distancia, especialmente a partir del 1500, y totalmente impropio con distancias superiores, que se disputan a VAM o velocidades inferiores.

La llamada *tolerancia al lactato* se diferencia de la *máxima producción de lactato* o *potencia láctica glucolítica*, por usarse porcentajes más bajos, siendo más habitual el entrenamiento de la primera, en el que se busca ejercitarse durante muchos esfuerzos bajo las difíciles sensaciones de la acidosis, como en el ejemplo de la figura 1.7.5. Esta terminología es aceptable pese a que se asuma que el lactato no es causante directo de la fatiga, pues pese a ello se cree que los elevados niveles de lactato sanguíneo afectarían las aferencias nerviosas musculares de los grupos III-IV y con ello incrementarían la sensación de fatiga (Westerblad *et al* 2002).

Figura 1.7.7

Zonas de entrenamiento empleadas para la mejora de la Capacidad Anaeróbica (basado en Billat 2002 y Polishuk 1992)

a)	INTENSIDAD (% de la marca en la distancia -200 a 500m)	INTENSIDAD (% de la VAM)	DURACIÓN de la repetición	PAUSAS (duración)	RECUPERACIÓN (duración)
POTENCIA GLUCOLÍTICA	95-91%	120-115	25-90 s	-	10-15 min
CAPACIDAD GLUCOLÍTICA	91-86%	115-110	30 s a 4 min	1,5 min - 3 min	8-10 min

EQUIVALENCIAS RESPECTO A LOS % DE LA MARCA DE LA COLUMNA IZQUIERDA					
b)	INTENSIDAD (% de la marca, para distancias de 200 a 500m)	INTENSIDAD (% de la VAM, para distancia de 300m)	INTENSIDAD (% de la VAM, para distancias de 200 a 500m)	INTENSIDAD (% de la VAM, para distancias de 600 a 1000m)	INTENSIDAD (% de la VAM, para distancias de 1500m)
	95	120	112-123	110-108	102
	90	115	107-120	106-104	97
	85	110	105-118	101-100	93
	80	105	100-110	98-95	88

Parece que unos altos niveles de desarrollo de la potencia aeróbica contribuyen a la rápida adaptación y tolerancia a estos esfuerzos por parte de los corredores de fondo (Esteve-Lanao 2007a), probablemente por su mayor capilarización, como se indicó anteriormente (Lucía 2005).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ESTE APARTADO:

Abe T, Kumagai K, Brechue WF. Fascicle length of leg muscles is greater in sprinters than distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:1125-1129.

Acevedo E, Goldfarb AH. Increased training intensity effects on plasma lactate, ventilatory threshold, and endurance. *Med Sci Sports Exerc* 1989;21:563-568.

Astrand PO, Rodahl K. Textbook of work physiology. New York: McGraw-Hill, 423-427, 1986.

Babineau C, Leger L. Physiological response of 5/1 intermittent aerobic exercise and its relationship to 5 km endurance performance. *Int J Sports Med* 1997;18:13-19.

Billat V. Fisiología y Metodología del Entrenamiento. Paidotribo, Barcelona 2002.

Billat V. Interval training for performance: A scientific and empirical practice. Special recommendations for middle- and long-distance running. Part I: Aerobic Interval Training. *Sports Med* 2001;31:13-31.

Billat VL, Slawinski J, Bocquet V, Chassaing P, Demarle A, Koralsztein JP. Very short (15s-15s) interval-training around the critical velocity allows middle-aged runners to maintain VO₂ max for 14 minutes. *Int J Sports Med* 2001;22:201-208.

Billat VL, Slawinski J, Bocquet V, Demarle A, Lafitte L, Chassaing P, Koralsztein JP. Intermittent runs at the velocity associated with maximal oxygen uptake enables subjects to remain at maximal oxygen uptake for a longer time than intense but submaximal runs. *Eur J Appl Physiol* 2000;81:188-196.

Coetzer P, Noakes TD, Sanders B, Lambert MI, Bosch AN, Wiggins T, Dennis SC. Superior fatigue resistance of elite black South African distance runners. *J Appl Physiol* 1993;75:1822-1827.

- Cunningham DA, McCrimmon D, Vlach LF. Cardiovascular response to interval and continuous training in women. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1979;41:187-197.
- Demarie S, Koralzstein JP, Billat V. Time limit and time at VO₂ max during continuous and an intermittent running. *J Sports Med Phys Fitness* 2000;40:96-102.
- Eddy DO, Sparks KL, Adelizi DA. The effects of continuous and interval training in women and men. *J Appl Physiol Occup Physiol* 1977;37:83-92.
- Essen B. Glycogen depletion of different fibre types in human skeletal muscle during intermittent and continuous exercise. *Acta Physiol Scand* 1978;103:446-455.
- Esteve-Lanao J. El entrenamiento de la fuerza y resistencia en corredores: últimas tendencias y aplicaciones. EN: Jiménez A (Coord) Avances en CC de la Af y el Deporte, Escuela de Estudios Universitarios UEM-Real Madrid, Madrid 2007a.
- Esteve-Lanao J. El entrenamiento de la fuerza en deportes de resistencia: Una propuesta de Entrenamiento y Control de la Fuerza Específica en Corredores de Fondo EN: Jiménez A. Entrenamiento de Fuerza: Avances y nuevas tendencias. INDE, Barcelona 2007b (en prensa).
- Full RJ, Farley CT. Musculoskeletal dynamics in rhythmic systems: A comparative approach to legged locomotion. EN: Winters JM, Crago (eds) Biomechanics and Neural Control Posture and Movement. New York: Springer-Verlag, 2000.
- Gacon G. Hacia una nueva definición del trabajo máximo aeróbico del mediodondista. Cuadernos de Atletismo pp67-94, RFEA-ENE, Madrid, 1990.
- Gaesser GA, Wilson LA. Effects of continuous and interval training on the parameters of the power-endurance time relationship for high-intensity exercise. *Int J Sports Med* 1988;9:417-421.
- Gorostiaga EM, Walter CB, Foster C, Hickson RC. Uniqueness of interval and continuous training at the same maintained exercise intensity. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1991;63:101-107.
- Gregory LW. The development of aerobic capacity: a comparison of continuous and interval training. *Res Q* 1979;50:199-206.
- Herzog W. Muscle properties and coordination during voluntary movement. *J Sports Sci* 2000;18:141-152.
- Laursen PB, Jenkins DG. The scientific basis for high-intensity interval training. Optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med* 2002;32:53-73.
- Hermansen L, Osnes JB. Blood and muscle pH after maximal exercise in man. *J Appl Physiol* 1972;32:304-308.
- Hoff J. Comunicación personal. International Conference on Strength Training, Odense 2006.
- Hoff J y Helgerud J. Endurance and Strength Training for Soccer Players. *Sports Med* 2004;34:165-180.
- Hoff J, Helgerud J, Wisloff U. Maximal strength training improves work economy in trained female cross-country skiers. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:870-877.
- Larsen HB, Christensen DL, Nolan T, Sondergaard H. Body dimensions, exercise capacity and physical activity level of adolescent Nandi boys in western Kenya. *Ann Hum Biol* 2004;31: 159-173.
- Laursen PB, Shing CM, Peake JM, Coombes JS, Jenkins DG. Interval training program optimization in highly trained endurance cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:1801-1807.
- Lindsay FH, Hawley JA, Myburgh KH, Schomer HH, Noakes TD, Dennis SC. Improved athletic performance in highly trained cyclists after interval training. *Med Sci Sports Exerc* 1996;28:1427-1434.

- Lozano F. Comunicación personal. Máster Entrenamiento y Nutrición Madrid, Escuela de Estudios Universitarios UEM-Real Madrid, Madrid 2006.
- Lucía A, Esteve-Lanao J, Olivan J, Gomez-Gallego F, San Juan AF, Santiago C, Perez M, Chamorro-Vina C, Foster C. Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Appl Physiol Nutr Metab* 2006;31:530-540.
- Lucía A. Perspectives on high volume training in middle distance athletes. USSF Coaches Seminar, 2005.
- Mikessell KA, Dudley GA. Influence of intense endurance training on aerobic power of competitive distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 1984;16:371-375.
- Millet GP, Jaouen B, Borrani F, Candau R. Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and VO₂ kinetics. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:1351-1359.
- Moffatt RJ, Stamford BA, Weltman A, Cuddihee R. Effects of high intensity aerobic training on maximal oxygen uptake capacity and field test performance. *J Sports Med Phys Fitness* 1977;17:351-359.
- Olsen R, Berg K, Latin R, Blanke D. Comparison of two intense interval training programs on maximum oxygen uptake and running performance. *J Sports Med Phys Fitness* 1988;28:158-164.
- Paavolainen L, Häkkinen K, Hämmäläinen I, Nummela A, Rusko H. Explosive-strength training improves 5-Km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol* 1999;86:1527-1533.
- Péronnet F (coord) Maratón. INDE, Barcelona 2001.
- Peterson MJ, Palmer DR, Laubach LL. Comparison of caloric expenditure in intermittent and continuous walking bouts. *J Strength Cond Res* 2004;18:373-376.
- Platonov VN. Teoría General del Entrenamiento Deportivo Olímpico, 2001.
- Polishuk, DA. El ciclismo : preparación, teoría y práctica (1ªed). Paidotribo, Barcelona, 1992.
- Sahlin K, Harris RC, Ny Lind B, Hultman E. Lactate content and pH in muscle obtained after dynamic exercise. *Pflugers Arch* 1976;367:143-149.
- Saltin B, Larsen H, Terrados N, Bangsbo J, Bak T, Kim CK, Svedenhag J, Rolf CJ. Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports* 1995;5: 209-221.
- Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley JA. Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med* 2004;34:465-485.
- Spurrs RW, Murphy AJ, Watsford ML. The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur J Appl Physiol* 2003;89:1-7.
- Stephens NK, Martin DT, Fallon KE, Hawley JA. Metabolic demands of intense aerobic interval training in competitive cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:303-310.
- Stephens NK, Hawley JA, Dennis SC, Hopkins WG. Effects of different interval-training programs on cycling time-trial performance. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:736-741.
- Swain DP, Franklin BA. VO₂ reserve and the minimal intensity for improving cardiorespiratory fitness. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:152-157.
- Tanaka H, Swensen T. Impact of resistance training on endurance performance. A new form of cross-training? *Sports Med* 1998;25:191-200.
- Toumi H, Best T. Muscle plasticity following plyometric and combined (plyometric and resistance) training. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36:Suppl abstract 1153.
- Turner AM, Owings JM, Schwane JA. Six weeks of plyometric training improves running economy. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31: Suppl abstract 1556.

Vuorimaa T, Vasankari T, Rusko H. Comparison of physiological strain and muscular performance of athletes during two intermittent running exercises at the velocity associated with VO_2 max. *Int J Sports Med* 2000;21:96-101.

Westerblad H, Allen DG, Lannergren J. Muscle fatigue: lactic acid or inorganic phosphate the major cause? *News Physiol Sci* 2002;17:17-21.

Westgarth-Taylor C, Hawley JA, Rickard S, Myburgh KH, Noakes TD, Dennis SC. Metabolic and performance adaptations to interval training in endurance-trained cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1997;75:298-304.

Weston AR, Mbambo Z, Myburgh KH. Running economy of African and Caucasian distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:1130-1134.

Weston AR, Myburgh KH, Lindsay FH, Dennis SC, Noakes TD, Hawley JA. Skeletal muscle buffering capacity and endurance performance after high-intensity interval training by well-trained cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1997;75:7-13.

Zatsiorsky V . Science and practice of strength training. Human kinetics, Champaign IL 1995.

1.8. – Sobreentrenamiento

La base de todo concepto de entrenamiento y sobreentrenamiento proviene del modelo trifásico de Selye (1976), conocido como Síndrome General de Adaptación, que establece que la exposición repetida a elementos de estrés provoca inicialmente un descenso en el rendimiento (Estado de reacción de Alarma). Sin embargo, si esto no conduce a un estado extenuación, la resistencia del organismo aumenta (Estado de Resistencia), mientras que si el estrés resulta excesivo, provoca un tercer estado (Estado de Extenuación). Aunque esta teoría parece adecuada pero es necesaria más investigación para sustentarla (Halsón y Jeukendrup 2004).

Al hablar de sobreentrenamiento, el primer aspecto importante a aclarar es la terminología. En castellano englobamos bajo el término "sobreentrenamiento", lo que en inglés tiene al menos dos términos con matices importantes: *overreaching* y *overtraining*. Sería simplista traducirlos como estados en los que el atleta está "sobreentrenándose" o bien "sobreentrenado", aunque puede ser útil, de forma inicial, para aclarar diferencias. Las definición de estos términos tendría una parte común, que se ha sugerido como "estrés acumulado resultante del entrenamiento y / o estrés ajeno al entrenamiento que produce disminución de la capacidad de rendimiento (...) con o sin signos fisiológicos y psicológicos de sobreentrenamiento en el cual el proceso de recuperación de la capacidad de rendimiento requerirá un tiempo (...)" (Halsón y Jeukendrup 2004, Kreider *et al* 1998).

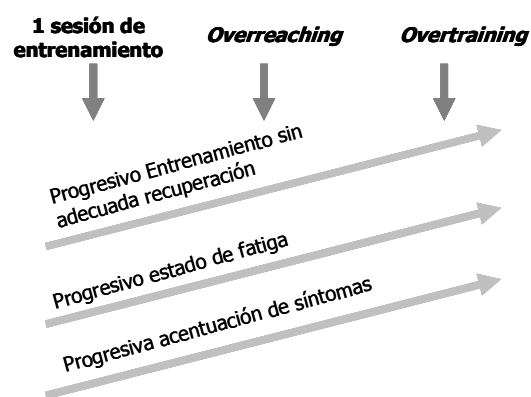
Para varios autores la parte indicada con "... " correspondería, en el caso del *overreaching*, a un plazo corto, que rondaría varios días o un par de semanas, mientras que en el caso del *overtraining*, esto sería "a largo plazo", de varios meses o incluso años. (Kellman 2002, Kreider *et al* 1998).

Otra posible confusión puede venir por diferencias en algunos términos usados por autores norteamericanos, como por ejemplo *staleness*, para referirse a lo que los europeos suelen llamar *overtraining* o síndrome de *overtraining*. En cualquier

caso, este tipo de términos serían el producto o consecuencia de un entrenamiento acentuado respecto a lo habitual. Este proceso de entrenamiento que comportaría *overreaching* o *overtraining* es a menudo concebido como un "continuo" (Fry *et al* 1991) (figura 1.8.1)

De acuerdo con este proceso, deberían ocurrir 2 fenómenos: en primer lugar, el atleta, entrenador o científico del deporte deberían reconocer los síntomas asociados al *overreaching* y proporcionar un descanso adecuado. Tras ello, la recuperación sería total y el proceso provocaría un efecto de supercompensación y el rendimiento mejoraría por encima que el nivel previo (O'Toole 1998).

Figura 1.8.1
Concepto de Sobreentrenamiento
Overreaching vs Overtraining
(a partir de la definición de Kreider *et al* 1998)



De no producirse nunca una adecuada recuperación, posterior al *overreaching* se desarrollaría progresivamente un estado de *overtraining*.

Es decir, esto ocurriría por seguir proporcionando estímulos progresivos de entrenamiento, creyendo, de forma equivocada, que la reducción del rendimiento era problema de falta de estímulos superiores de entrenamiento. (Halsón y Jeukendrup 2004).

Aunque los estudios de sobreentrenamiento administran incrementos bruscos de carga, como diseño de investigación, lógicamente el entrenamiento no tiene por qué programarse así, por lo menos habitualmente. Por ello creemos más adecuada la propuesta de Nederhof y colaboradores, en cuanto a discriminar

dentro del concepto de *overreaching*. Estos autores diferencian un "*overreaching* funcional", que desaparece en los plazos breves previstos permitiendo adaptaciones positivas, y un "*overreaching* no funcional", cuya fatiga se prolonga más allá de lo previsto, con lo que puede interferir con las fechas de competición, y puede provocar pérdida de forma debido al mayor tiempo de recuperación que requiere, aunque no llegue al "*overtraining*". Este "*overtraining*" se caracterizaría, además de un rendimiento deteriorado por largo tiempo, de síntomas más severos (Nederhof *et al* 2006) (figura 1.8.2).

Por no haber hecho esta distinción, algunos autores han considerado el *overreaching* como algo relativamente normal en el proceso de entrenamiento (Halsón y Jeukendrup 2004), lo cual no se entiende muy bien desde el punto de vista del proceso de entrenamiento, pues englobaría tanto el proceso esperado (supercompensación) como el no deseado (fatiga excesiva sin supercompensación). Por ello creemos más adecuada la distinción de Nederhof y colaboradores.

Figura 1.8.2
Terminologías de Sobreentrenamiento
"*Overreaching*" vs "*Overtraining*"
(adaptado de Nederhof *et al* 2006)

Concepto	Síntomas	Tiempo para recuperar el rendimiento
<i>Overreaching</i> Funcional	Leves	Días o Semanas
<i>Overreaching</i> No Funcional	Medios	Semanas o Meses
<i>Overtraining</i>	Severos	Meses o Años

Selye concebía el estrés como un "síndrome específico", aunque "no sea provocado específicamente", y pueda provocar una variedad de respuestas no-específicas (Selye 1976)

De hecho hoy día en el entrenamiento se asume que hay otros elementos "estresantes" que influyen en este proceso, como el exceso de competiciones. Más allá, aunque el estrés fisiológico es la causa más importante del *overreaching* no-funcional y del *overtraining*, se sabe que la regeneración también se ve afectada por el estrés psicológico y social (Meehan *et al*

2004, Kenttä y Hassmén 1998, Lehmann *et al* 1998, Hooper *et al* 1995).

Por ejemplo, recientemente se ha estudiado en soldados que los períodos prolongados de falta de sueño parecen ser uno de los principales responsables de las alteraciones hormonales en sujetos sobreentrenados (Booth *et al* 2006). Un corredor que experimente altos niveles de estrés por el trabajo o los estudios está pues sujeto a mayor riesgo de *overreaching* o incluso *overtraining* que otro que no lo padece. Así mismo puede ocurrir por cambios bruscos, como por ejemplo la muerte de un familiar.

Por otra parte existe una capacidad individual para tolerar el estrés, tanto físico como mental o social (Kenttä y Hassmén 1998).

En resumen, de cara a la posible afectación de un *overreaching* no-funcional o un *overtraining* son importantes no solo los niveles de estrés físico, mental y social a los que se expone el atleta, sino su capacidad individual global para afrontarlos y su capacidad de regeneración (Kenttä y Hassmén 1998).

Sin embargo, la información respecto al sobreentrenamiento es anecdótica casi por completo, porque la mayoría de estudios estudian atletas en estado de *overreaching*, dado que nos es ético provocar deliberadamente un estado de *overtraining*, por lo que los casos diagnosticados obedecen a sujetos que se han sobreentrenado, sin poderse conocer el proceso previo con detalle.

Pero es fundamental indicar que científicamente todavía no hay herramientas diagnósticas para identificar a un atleta como sobreentrenado (Neherdof *et al* 2006, Halsón y Jeukendrup 2004), y que el diagnóstico solo puede hacerse por excluir todas las demás posibles influencias en el rendimiento o estado de ánimo (Moeller 2004, Halsón y Jeukendrup 2004).

Parece haber consenso en que el síndrome de *overtraining* se caracteriza por la perturbación del estado de ánimo y un estado afectivo negativo, aunque esto debe acompañarse necesariamente de un descenso en el rendimiento durante largo tiempo, pues existen enfermedades como

el síndrome de fatiga crónica o la depresión con síntomas similares. Toda esta imprecisión ha hecho cuestionar la existencia desde un punto de vista científico del síndrome de sobreentrenamiento (Halsón y Jeukendrup 2004).

Por tanto, en realidad no hay evidencias objetivas para caracterizar a alguien como sobreentrenado, y simplemente se acepta vagamente que los síntomas para diferenciar un estado de *overreaching* o de *overtraining* son más severos en unos que en otros (Halsón y Jeukendrup 2004).

Así, aunque a menudo se han dado cifras de una incidencia de entre el 20 y 60% de los deportistas afectados alguna vez por sobreentrenamiento, parece que la incidencia del *overtraining* es mucho menor, confundándose a menudo con el llamado *overreaching* no-funcional (Nederhof *et al* 2006).

Los motivos son fundamentalmente la falta de terminología común y la evaluación del rendimiento carente en algunos casos (Nederhof *et al* 2006, Halsón y Jeukendrup 2004). Tales marcadores que permitieran identificar estos estados de sobreentrenamiento deberían tener una serie de características como el ser objetivos, no-manipulables, aplicables en la práctica del entrenamiento, no muy exigentes para el atleta, asequibles para la mayoría de atletas, y lógicamente estar basados en una sólida teoría demostrada.

Otro planteamiento no contrastado científicamente es el clásico concepto de que hay 2 tipos de *overtraining*: uno de predominio simpático y otro de tipo parasimpático. Este concepto, habitualmente citado, proviene de Israel en 1976.

Algunos han indicado que el parasimpático es un estado derivado del simpático (Lehmann *et al* 1998), siendo diagnosticado por este grupo en otro trabajo solo en aquellos que incrementaron el volumen de entrenamiento frente a un grupo que incrementó la intensidad (Lehmann *et al* 1992). Este grupo ha publicado por separado los resultados de ese experimento en otros 4 trabajos, hallando además diferencias en la excitabilidad neuromuscular, predominancia del sistema parasimpático, e incrementos en ambos

grupos respecto a la percepción de dureza (un índice de 1 a 4 respecto a la dureza de sensaciones). De modo opuesto, Kinderman (1986) indicó evidencias de que el entrenamiento de intensidad debería provocar mayor incidencia de *overtraining* que un incremento no habitual del volumen.

Pero se ha criticado que la diferenciación teórica de *overtraining* simpático o parasimpático por falta de datos que lo justifiquen (Halsón y Jeukendrup 2004).

Teniendo bien presente todo lo anteriormente expuesto, a continuación se muestran las variables sugeridas a lo largo de los diversos estudios para la posible detección de estados de *overreaching* no-funcional u *overtraining*.

Estado de ánimo

Parece interesante evaluar el estado de ánimo, pues son de las pocas variables donde hay consenso, asumiéndose que las alteraciones psicológicas y los estados afectivos negativos caracterizan el síndrome de sobreentrenamiento. Sin embargo, estas alteraciones deben acompañarse de descensos en el rendimiento para poder tomarse como signos de *overreaching* u *overtraining*, y no como desórdenes puramente psicológicos (Halsón y Jeukendrup 2004).

Frecuencia cardiaca

Clásicamente se ha sugerido que la FC en reposo al despertarse por la mañana se muestra aumentada en situación de *overtraining* o puede ser signo de *overreaching* (Kinderman 1986, Dressendorfer *et al* 1985, Israel 1958).

También la FC durante el sueño estaría elevada, y parece más recomendable porque ésta puede verse menos afectada por otras variables. (Jeukendrup y Van Diemel 1998, Jeukendrup *et al* 1992).

Otros, además de éstas dos, recomiendan empíricamente la medición a los 20 segundos de levantarse de la cama tras despertarse por la mañana, así como nuevamente al cabo de unos minutos (Noakes 2003).

Por el contrario, la FC submáxima en ejercicio no parece tan claro que se vea alterada (Achten y Jeukendrup 2003).

Otro signo puede ser la dificultad para alcanzar la FC máxima habitual, donde hay más controversia en los estudios, si bien puede ser interesante controlarla periódicamente como prevención del sobreentrenamiento (Zavorsky 2000). La dificultad para alcanzarla puede ser tanto por la dificultad muscular en alcanzar altas velocidades, es decir, por fatiga puntual, como por reflejar una disminución de la actividad simpática (Lucía *et al* 2003), y con ello ser un signo de *overreaching*.

Más modernamente se viene utilizando la variabilidad de la FC (HRV). Incluso si la FC es relativamente estable, el tiempo que transcurre entre dos latidos puede variar notablemente, sin incurrir necesariamente en arritmias. Esto es, que aunque la FC sea por ejemplo de 60 pulsaciones por minuto (ppm), no habrá un latido cada 1.00 segundos exactamente. Ciertos índices de esta variabilidad de la FC se considera que reflejan una predominancia simpática o bien un equilibrio simpático-vagal, y con ello indicadores del inicio de *overreaching* (Achten y Jeukendrup 2003).

La variabilidad de la frecuencia cardiaca se ha indicado como como útil para monitorizar de forma cotidiana el estado de recuperación de los atletas (Baumert *et al* 2006a) y de este modo parece que los indicadores de *overreaching* desaparecen rápidamente con 3-4 días de recuperación (Baumert *et al* 2006b).

Cierto es que otros estudios no han hallado estas utilidades de la FC (Achten y Jeukendrup 2003, Hedelin *et al* 2000)

Lactato

Se han observado descensos en la producción de lactato fruto de programas intensificados de entrenamiento, para lo cual la ingesta calórica y los niveles de glucógeno deben ser controlados y acompañados de descensos en el rendimiento (Halson y Jeukendrup 2004).

Como herramienta sencilla, Snyder, Foster y colaboradores (Snyder *et al* 1993, Foster *et al* 1990) propusieron comprobando descensos en rendimiento tras protocolos

de intensificación del entrenamiento en patinadores de velocidad y ciclistas un índice rápido y sencillo para detectar el *overreaching*: dividir el lactato sanguíneo ($\text{mMol}\cdot\text{L}^{-1}$) entre la percepción de esfuerzo (escala de 0 a 10) y multiplicarlo por 100 ($\text{bLA}:\text{RPE}\cdot 100$).

Alteraciones metabólicas

La inadecuada restitución de los niveles de glucógeno puede asociarse al sobreentrenamiento (Costill *et al* 1988), aunque no es el elemento único y no es preciso que esto ocurra para producirse el *overreaching* (Mackinnon y Hooper 2000).

A través de diversos experimentos en remeros, Petibois y colaboradores (2003) han planteado un modelo metabólico que diferenciaría el *overreaching* del *overtraining* por cuanto el primer estado se caracterizaría por un proceso de alteración metabólica, que sería inicialmente de los carbohidratos, posteriormente de los lípidos, y en último lugar de las proteínas. Precisamente esta última alteración marcaría el paso del estado de *overreaching* hacia el *overtraining*, que podría ocurrir ya en unas 10 semanas. Este diagnóstico sin embargo no es sencillo, pues se debe hacer mediante espectrometría de la absorción de infrarrojos en muestras de plasma sanguíneo tomadas en ejercicio (concretamente lo hacían en sesiones de remo de 18km a intensidad alrededor del 80% del VO_2max).

Alteraciones inmunológicas

Existen numerosos trabajos que han indicado infecciones del tracto de las vías respiratorias superiores, estudiando la posible deficiencia del sistema inmunológico fruto del ejercicio en atletas *overreached* u *overtrained*, por el hecho de que este estado pudiera suponer un ensanchamiento de la llamada "ventana abierta" o debilidad del sistema inmunológico post-ejercicio (Smith 2000). Pero se critica que existen pocas evidencias para justificarlo, más allá de que el entrenamiento intensificado lo incrementa, pero quizá sea al margen de un estado de *overreaching* u *overtraining* (Halson y Jeukendrup 2004).

Alteraciones hormonales

Un modelo fisiológico único para evaluar los efectos de la administración de esfuerzos de gran dureza de forma frecuente lo representan las carreras ciclistas por etapas. En un Tour de Francia o una Vuelta a España los ciclistas realizan $\geq 85-90$ horas de competición repartidas en 21 días.

En este tipo de competición, así como en otros trabajos experimentales con corredores, se han sugerido estados de agotamiento de la actividad de la noradrenalina (Lehmann *et al* 1992), cortisol, testosterona y melatonina (Lucía *et al* 2001).

Pero aunque se acepta comúnmente que el cortisol es una hormona que refleja el estrés y la testosterona una de las hormonas anabólicas, una revisión reciente ha señalado que el ratio testosterona/cortisol no parece discriminar a los atletas *overreached* de los bien entrenados. Así mismo que otros trabajos con hormonas como la GH o a ACTH no permiten establecer conclusiones claras debido a las diferencias en formas de medir el rendimiento e intensificación del entrenamiento (Halson y Jeukendrup 2004).

Otros

Entre otros posibles marcadores que se han señalado en los últimos tiempos, se han indicado elementos bioquímicos como la proteína de enlace con la IGF-3 (Elloumi *et al* 2005) o el ADN libre circulante en plasma (Fatouros *et al* 2006).

Una de las últimas propuestas en la bibliografía científica, aunque su origen no es tan reciente, ha sido la evaluación velocidad de reacción, un medio mucho más simple. Ésta se ha sugerido como posible variable para la detección del *overreaching* no funcional y el sobreentrenamiento. Esto se ha llamado "velocidad psicomotriz", y se ha evaluado con tareas diversas, midiendo el tiempo de reacción a estímulos sonoros o visuales, simples o discriminativas, así como tareas cognitivas, como el cálculo o la memoria a corto plazo (Nederhof *et al* 2006). Aunque estas variables se han estudiado

fundamentalmente en el síndrome de fatiga crónica y la depresión, dada la semejanza de rasgos con estas patologías, se cree que sería un índice aplicable a la detección de *overreaching* no funcional y *overtraining* (Nederhof *et al* 2006).

En definitiva, no existen marcadores únicos o definitivos del *overreaching* u *overtraining*. De hecho, no quedan claros o no hay consenso para discriminar de qué estamos hablando al utilizar esos términos, y faltan criterios para diagnosticarlos.

Dentro de estas dificultades tan básicas, se asume que el *overreaching* es un estado previo al *overtraining*, pudiendo ser lógico y deseable por el proceso de entrenamiento, "tapering" y supercompensación, o bien ser la consecuencia de un exceso de cargas y disminución de tolerancia al estrés en general. Existen ciertos signos para intuir el *overreaching*, de muy diverso grado de coste y complejidad.

A la vista de lo expuesto en este apartado, la figura 1.8.3 resume las medidas que pueden tomarse como prevención.

Figura 1.8.3

Medidas para Prevenir el *Overreaching* (adaptado de Mackinnon y Hooper 2000)

- Minimizar causas conocidas como:
 - Cambios bruscos en carga de entrenamiento
 - Ingesta insuficiente de hidratos de carbono
 - Estrés ajeno al entrenamiento
 - Alta densidad de competiciones
 - Insuficiente recuperación post-competición y entre temporadas
- Individualizar el entrenamiento
- Periodizar el entrenamiento
- Programar la recuperación como parte del entrenamiento
- Monitorizar a los atletas para detectar posibles signos:
 - Cuantificación del rendimiento
 - Cuantificación del entrenamiento real (variables externas e internas)
 - Control de las sensaciones de entrenamiento (estado de ánimo, bienestar, dolor muscular, calidad de sueño, irritabilidad)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ESTE APARTADO:

Achten J, Jeukendrup AE. Heart rate monitoring: applications and limitations. *Sports Med* 2003;33:517-538.

- Baumert M, Brechtel L, Lock J, Voss A. Changes in heart rate variability of athletes during a training camp. *Biomed Tech* 2006a;51:201-204.
- Baumert M, Brechtel L, Lock J, Hermsdorf M, Wolff R, Baier V, Voss A. Heart rate variability, blood pressure variability, and baroreflex sensitivity in overtrained athletes. *Clin J Sport Med* 2006b;16:412-417.
- Booth CK, Probert B, Forbes-Ewan C, Coad RA. Australian army recruits in training display symptoms of overtraining. *Mil Med* 2006;171:1059-1064.
- Costill DL, Flynn MG, Kirwan JP, Houmard JA, Mitchell JB, Thomas R, Park SH. Effects of repeated days of intensified training on muscle glycogen and swimming performance. *Med Sci Sports Exerc* 1988; 20:249-254.
- Dressendorfer RH, Wade CE, Schaff JH. Increased heart rate in runners: a valid sign of overtraining? *Physician Sports Med* 1985;13:77-86.
- Elloumi M, El Elj N, Zaouali M, Maso F, Filaire E, Tabka Z, Lac G. IGFBP-3, a sensitive marker of physical training and overtraining. *Br J Sports Med* 2005;39:604-610.
- Fatouros IG, Destouni A, Margonis K, Jamurtas AZ, Vrettou C, Kouretas D, Mastorakos G, Mitrakou A, Taxildaris K, Kanavakis E, Papassotiriou I. Cell-free plasma DNA as a novel marker of aseptic inflammation severity related to exercise overtraining. *Clin Chem* 2006; 52:1820-1824. Epub 2006 Jul 13.
- Foster C, Snyder AC, Thompson N. *Physiology of Speed Skating: A monograph for American speed skating coaches*. Milwaukee, WI, Sinai Samaritan Medical Center, 1990.
- Fry RW, Morton AR, Keast D. Overtraining in athletes. An update. *Sports Med* 1991;12:32-65.
- Halson SL, Jeukendrup AE. Does overtraining exist? An analysis of overreaching and overtraining research. *Sports Med* 2004;34:967-81.
- Hedelin R, Kentta G, Wiklund U, Bjerle P, Henriksson-Larsen K. Short-term overtraining: effects on performance, circulatory responses, and heart rate variability. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:1480-1484.
- Hooper SL, Mackinnon LT, Howard A, Gordon RD, Bachmann AW. Markers for monitoring overtraining and recovery. *Med Sci Sports Exerc* 1995;27:106-112.
- Israel S. Problems of overtraining from an internal medical and performance physiological standpoint. *Med Sport* 1976;16:1-12.
- Israel S. Die Erscheinungsformen des Übertrainings. *Med Sport* 1958;9:207-209.
- Jeukendrup A, Van Diemen A. Heart rate monitoring during training and competition in cyclists. *J Sports Sci* 1998;16:1-9.
- Jeukendrup AE, Hesselink MKC, Kuipers H, et al. Physiological changes in male competitive cyclists after two weeks of intensified training. *Int J Sports Med* 1992;13:534-541.
- Kenttä G, Hassmén P. Overtraining and recovery. A conceptual model. *Sports Med* 1998;26:1-16.
- Kellmann M. Underrecovery and overtraining: different concepts, similar impact?. EN: Kellmann M (Ed). *Enhancing recovery: preventing underperformance in athletes*. Human Kinetics, Champaign (IL) 2002.
- Kindermann W. Overtraining-expression of disturbed autonomic regulation? *Dtsch Z Sportsmed* 1986;8:238-245.
- Kreider R, Fry A, O'Toole ML. Overtraining in sport: terms, definitions, and prevalence. EN: Kreider R, Fry A, O'Toole ML (Eds). *Overtraining in sport*. Human Kinetics, Champaign (IL) 1998.
- Lehmann M, Foster C, Dickhuth HH, Gastmann U. Autonomic imbalance hypothesis and overtraining syndrome. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:1140-1145.

Lehmann M, Foster C, Keul J. Overtraining in endurance athletes: a brief review. *Med Sci Sports Exerc* 1993;25:854-862.

Lehmann M, Baumgartl P, Wiesenack C, Seidel A, Baumann H, Fischer S, Spori U, Gendrisch G, Kaminski R, Keul J. Training-overtraining: influence of a defined increase in training volume vs training intensity on performance, catecholamines and some metabolic parameters in experienced middle- and long-distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1992;64:169-177.

Lucia A, Hoyos J, Santalla A, Earnest C, Chicharro JL. Tour de France versus Vuelta a Espana: which is harder? *Med Sci Sports Exerc* 2003;35:872-878.

Lucia A, Diaz B, Hoyos J, Fernandez C, Villa G, Bandres F, Chicharro JL. Hormone levels of world class cyclists during the Tour of Spain stage race. *Br J Sports Med* 2001;35:424-430.

Mackinnon LT, Hooper SL. Overtraining and overreaching: causes, effects and prevention. EN: Garret WE, Kierkendall DT. Exercise and Sport Sciences. Lippincott, Williams & Wilkins, Philadelphia 2000.

Meehan HL, Bull SJ, Wood DM. The overtraining syndrome: a multi-contextual assesment. *Sport Psychologist* 2004;18:154-171.

Moeller JL. The athlete with fatigue. *Curr Sports Med Rep* 2004;3:304-309.

Nederhof E, Lemmink KA, Visscher C, Meeusen R, Mulder T. Psychomotor speed: possibly a new marker for overtraining syndrome. *Sports Med* 2006;36:817-828.

Noakes T. Lore of Running (4thed). Human Kinetics, Champaign-IL, 2003.

O'Toole ML. Overreaching and overtraining in endurance athletes EN: Kreider R, Fry A. O'Toole ML (Eds). Overtraining in sport. Human Kinetics, Champaign (IL) 1998.

Petibois C, Cazorla G, Poortmans JR, Deleris G. Biochemical aspects of overtraining in endurance sports: the metabolism alteration process syndrome. *Sports Med* 2003;33:83-94.

Selye H. The stress of life. Mc Graw-Hill, New Cork, 1976.

Smith LL. Cytokine hypothesis of overtraining: a physiological adaptation to excessive stress? *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:317-331.

Snyder AC, Jeukendrup AE, Hesselink MK, Kuipers H, Foster C. A physiological / psychological indicator of over-reaching during intensive training. *Int J Sports Med* 1993;14:29-32.

Zavorsky GS. Evidence and possible mechanisms of altered maximum heart rate with endurance training and tapering. *Sports Med* 2000;29:13-26.

1.9. – Estrategias de *Tapering*

Puesto que la fatiga puede atenuar o enmascarar los beneficios producidos por la acumulación de cargas de entrenamiento (Smith 2003), son necesarias disminuciones de la carga para obtener la esperada supercompensación posterior. Por ello, cumpliendo con los principios del entrenamiento de regeneración periódica y supercompensación, se conoce bajo el término inglés *taper* a la reducción de la carga de entrenamiento previa a la competición. Ese término ha derivado en el gerundio *tapering* como verbo para dicha estrategia de programación de entrenamiento.

En español no conocemos otra palabra que resuma dicho concepto. Esta estrategia es habitual entre los atletas y supone no sólo una adaptación física (Costill *et al* 1985) sino también psicológica (Wittig *et al* 1989).

El término *Taper* proviene de Carlile y Cotton en 1947, aunque no es hasta los años sesenta donde estos mismos autores, especialmente Forbes Carlile, entrenador de natación, destaca la importancia de este descanso previo a las competiciones. Uno de los primeros autores en el mundo de las carreras de fondo fue Stampfl, que ya en 1955 insistía en que sus fondistas descansaban por completo durante 4 días antes de una competición (Noakes 2003).

Pero esta estrategia no siempre ha sido costumbre de los corredores. Hay numerosas anécdotas de atletas de élite que accidentalmente han tenido que realizar un taper forzoso previo a una competición importante. En 1950 Zatopek entrenaba muy duro para los campeonatos de Europa de Bruselas cuando enfermó gravemente y fue hospitalizado durante 2 semanas, hasta dos días antes de la prueba de 10000. Pese a ello, la "locomotora humana" ganó con una distancia de una vuelta entera, y a los pocos días repitió en los 5000 por una diferencia de 23 segundos. A esto se le llamó "el fenómeno Zatopek" (Frederick 1983b citado por Noakes 2003).

Los maratones de los JJOO de Los Ángeles 84 son otro hito destacable. La ganadora de la prueba femenina, Joan Benoit, corrió los *trials* clasificatorios a los pocos días de una cirugía de artroscopia en la rodilla, algo

que podría haber interferido negativamente en su preparación, pero ganó tanto esa prueba como la de los juegos. Al lograrlo manifestó que probablemente ese hecho fuera positivamente decisivo, al obligarle a entrenar menos. De forma similar, el portugués Carlos Lopes sufrió un accidente que le obligó a descansar durante los 10 días previos a la carrera masculina. Sin embargo, aquél día comandó la prueba hasta el final para lograr también el oro olímpico (Noakes 2003).

También se han estudiado modelos teóricos de dosis-respuesta del entrenamiento en relación al rendimiento y la fatiga, contrastados razonablemente bien con el rendimiento real, y que apoyan la efectividad del *taper*.

Duración del *Taper*

Dichos modelos se han mostrado especial efectividad con una duración de 12 a 14 días antes de la competición, siendo en ese período perjudicial altas dosis de entrenamiento (Mújika *et al* 1995, Busso *et al* 1994, Morton *et al* 1990).

Diversos estudios experimentales han coincidido en hallar mejoras de alrededor del 3% tanto en corredores (Houmard *et al* 1994, Gibala *et al* 1994) como nadadores (Mújika *et al* 1995, Johns *et al* 1992, Costill *et al* 1985) con duraciones de entre 7 y 14 días. Otros trabajos han llegado hasta 21 días o más, y en este sentido se ha indicado que la duración parece dependiente la carga de entrenamiento previa (Rowbottom 2000, Fitz-Clarke *et al* 1991, Morton *et al* 1990).

Por ello se ha sugerido que debería probarse por cada corredor, pero que en general la importancia del taper será mayor conforme se entrene con mayor dureza y se vaya a competir en distancias más largas (Noakes 2003).

Por ejemplo, el famoso triatleta Mark Allen realizaba un taper de 4 semanas antes de un Ironman de Hawai, y de modo similar preparaba su puesta a punto Bruce Fordyce sus ultramaratones de Comrades (de ~90 kms), realizando el *taper* en las últimas 3 semanas, y especialmente corriendo muy poco los últimos 10 días (Noakes 2003)

Un meta-análisis reciente muestra que la duración óptima ronda las dos semanas (Bosquet *et al* 2007), aunque la mayoría de trabajos científicos en corredores se han realizado sobre los 7 días previos a la competición.

Por otra parte puede que la necesidad del *tapering* no afecte solo a la competición, sino que sería recomendable a final de cada mesociclo, para una adecuada adaptación a lo largo de la temporada, aunque esto no se haya experimentado en estudios de investigación controlados (Rowbottom 2000).

Volumen de entrenamiento en el *Taper*

Uno de los últimos trabajos publicados, muy recomendable para el lector interesado en este tema, es el meta-análisis anteriormente citado de Bosquet y colaboradores (2007). Recoge estudios de nadadores, corredores y ciclistas. Aunque la recomendación general es la de un mayor efecto del *taper* con reducciones del 41-60%, en corredores mostró mayor efecto descriptivo entre el 21 y 40%.

Esto parece constatarse en la realidad de que al menos en los corredores de alto nivel o élite, las reducciones de volumen no parecen ni mucho menos tan considerables. En el estudio de seguimiento de una temporada en corredores de campo a través de alto nivel de Houmard y colaboradores (1989), por ejemplo, el volumen del *taper* fue del 73% del entrenamiento previo, es decir, una reducción del 27%.

De modo similar, Arthur Newton (el más famoso ultrafondista en los años veinte), reducía un 15% su entrenamiento a 3 semanas de la competición, y en otro 10% a dos semanas antes (es decir, hasta un 25%).

En otros ultrafondistas de la época, y aunque no se dispone de datos sobre los famosos corredores del sXIX de las carreras de 6 días, descritos en el apartado 1.4, se sospecha que su estrategia sería similar (Noakes 2003). Noakes ha utilizado para sí mismo como corredor una reducción desde hasta el 26% en la última semana de preparación del ultramaratón de Comrades (Noakes 2003). Por tanto parece que en el

alto nivel coincide que los atletas tienden a reducir alrededor del 25-27% en la última semana.

Por tanto puede que la realidad en la reducción del volumen en alto nivel o elite sea algo menor de lo que la investigación sugiere.

Parece que la mejor tendencia de reducción es progresiva pero no-lineal, más bien exponencial (Fitz-Clarke *et al* 1991, Morton *et al* 1990). En el meta-análisis de Bosquet y colaboradores de 2007, ambas tendencias se analizaron de forma conjunta frente a la tendencia de tipo escalonado, siendo mayoritaria la progresiva.

Algunos estudios indicaron que era mejor una reducción progresiva, no brusca, de la carga de entrenamiento (Mújika 1998), sin embargo, posteriormente se recomendó una brusca reducción como mejor estrategia (Banister *et al* 1999), criterio que, hasta nuevos hallazgos, parece ser el vigente (Bosquet *et al* 2007).

Otro aspecto interesante en maratones y ultramaratones es conocer en qué semana debe realizarse la última semana de mayor volumen, antes de iniciar el descenso progresivo de cargas, aunque propiamente el *taper* sean los últimos días o semanas.

Tanto Noakes (2003) como Daniels (citado por Noakes 2003) coinciden en situar ese pico máximo de kilómetros preparando una maratón o ultramaratón a 5 semanas del final. Posteriormente Daniels propone, para un maratón y como recomendación general para un amplio margen de niveles, reducir al 80-70-70 y 60% en las posteriores, es decir, hasta un 40% en la última (Daniels, 2006).

Intensidad de entrenamiento en el *Taper*

Uno de los mejores estudios mostró una mejora del 22% en el tiempo límite a ritmo de marca personal de 1500 tras un *taper* de alta intensidad y bajo volumen frente a otro de baja intensidad y moderado volumen (y 6%) y otro de únicamente descanso (-3%), todos de 7 días (Shepley *et al* 1992). Aunque las pruebas de tiempo límite se critican por su diferencia respecto a las

competiciones, que se basan en distancia, parece bien demostrada la necesidad de intensidad durante el taper en otros estudios (Mújika *et al* 2000, Houmard *et al* 1994, Mc Conell *et al* 1993).

Los corredores de fondo, cuando reducen el entrenamiento de forma importante y prolongada, pueden experimentar adicción al entrenamiento, miedo a perder el nivel de condición física (Crossman *et al* 1987) o falta de sensaciones óptimas (Mújika *et al* 2002, Houmard y Johns 1994, Houmard 1991, Neuffer 1989).

Con estrategias de *taper* se ha sugerido que mantener la intensidad de entrenamiento favorece un estado de humor positivo (Wittig *et al* 1992) y varios trabajos han mostrado cambios positivos en relación al rendimiento (Berger *et al* 1999, Raglin *et al* 1996, Hooper *et al* 1999). Dichas sensaciones, aparte del comentado miedo a la pérdida de rendimiento, pueden estar relacionadas de un parte con la habilidad neuromuscular para desarrollar altas velocidades.

En un trabajo de Houmard y colaboradores (1992) sobre los efectos del cese total de entrenamiento en la pérdida progresiva del rendimiento y otras variables, se midió el rendimiento con una prueba de tiempo límite. Ésta fue la variable más empeorada en 14 días sin entrenamiento. La prueba era progresiva, con pendiente incrementada cada dos minutos en un 2%. A la vista de la velocidad inicial y de las velocidades finales obtenidas, la prueba finalizó entre el 10 y 12% de pendiente. Pese a no observarse empeoramiento de la sección transversal de músculo, es lógico pensar que la habilidad para generar potencia muscular, en definitiva el sistema neuromuscular, fuera el afectado por la falta de entrenamiento. Algo que, pese a que los autores no hicieran mención a ello en este estudio sobre desentrenamiento, creemos que refuerza la idea de que la intensidad es necesaria para mantener en ese caso o mejorar el rendimiento en cuanto al *taper*.

Sorprende también que en las investigaciones realizadas los diseños se hayan hecho con una intensidad constante que se repite todos los días, con entrenamientos interválicos de corta duración (400 metros habitualmente)

modificando el volumen de dicha carga únicamente. Limitando el trabajo continuo a breves calentamientos (800m). Este hecho, pese a su idoneidad para el control de variables en la investigación, no es habitual en el entrenamiento, donde suelen realizarse programaciones fijas para dichas semanas pero con intensidad variable.

En cualquier caso parece que existe consenso en otorgar a la intensidad un papel destacado, de modo que no debería reducirse durante el *taper* (Bosquet *et al* 2007)

Un aspecto interesante desde el punto de vista práctico es conocer cuál es el último día en el que se realiza un entrenamiento duro, que por lo anteriormente comentado sobre la reducción del volumen y necesidad de intensidad, se caracteriza por un entrenamiento relativamente duro donde predomina la intensidad.

Los modelos de predicción han hallado que el entrenamiento que el entrenamiento realizado a seis semanas de la competición tiene la mayor influencia positiva sobre ésta (Fitz-Clarke *et al* 1991) y se ha recomendado realizar el entrenamiento de mayor carga a 9 días de la competición, pero manteniendo cierta carga diaria de alta intensidad (Morton 1991).

Densidad de entrenamiento en el *Taper*

Parece que durante el taper son mayores las mejoras si se mantiene una alta frecuencia de entrenamientos (Mújika *et al* 2002). Respecto a mantener la frecuencia se ha argumentado evitar la pérdida de sensaciones (Mújika *et al* 2002, Houmard y Johns 1994, Houmard 1991, Neuffer 1989) sin que otras mediciones de glóbulos blancos, testosterona, cortisol o lactato hayan mostrado explicación a ello (Mújika *et al* 2000).

En los estudios con corredores el mantenimiento de la frecuencia de entrenamientos ha sido mucho más habitual que en los estudios con nadadores o ciclistas (Bosquet *et al* 2007)

Tal como anteriormente se ha indicado, experimentalmente se ha mantenido una dosis frecuente, aunque con volumen

reducido, de intensidad. Que esto deba aplicarse en todas las sesiones no está demostrado, pero puede ser necesario.

Modificaciones fisiológicas durante el Taper

En el trabajo de Shepley y colaboradores (1992) anteriormente citado, el $VO_2\text{max}$ no se modificó en ningún caso. Este hecho es común en estudios de una semana (Houmard *et al*/1990a, Houmard *et al*/1994) o 10 días (Houmard *et al*/1989), y aunque se hayan descrito descensos en 2 semanas (Houmard *et al*/1992), en otros casos no se ha visto disminución en 3 (Houmard *et al*/1990b) o 4 semanas (McConnell *et al*/1993).

Del mismo modo diversos estudios han mostrado descensos del volumen plasmático durante el cese o reducción de entrenamiento de más de dos semanas (Houmard *et al*/1990a, Houmard *et al*/1990b). Parece que el entrenamiento reducido a 3 días por semana puede ser suficiente para mantener el volumen plasmático, el volumen sistólico y el $VO_2\text{max}$ (McConnell *et al*/1993, Neuffer *et al*/1987).

Sorprendentemente el citado trabajo de Shepley y colaboradores (1992) halló incremento de glóbulos rojos y el volumen sanguíneo en el taper de una semana de alta intensidad y bajo volumen.

El mismo grupo mostró mejoras de la actividad de la enzima *citrato sintetasa* (CS) (18%), con lo quizás un incremento del potencial oxidativo. Tras dos semanas de cese de entrenamiento se hallaron disminuciones del 25% en otro estudio (Houmard *et al*/1992).

Parece haber mejoras de tipo neural, en cuanto a fuerza y potencia, por las que se produzcan mejoras en la economía, y las mejoras del 13-34% en contenido de glucógeno muscular hacen prever posibles mejoras en la capacidad para mantener un alto porcentaje del $VO_2\text{max}$ (Bosquet *et al*/2007).

En cuanto a mediciones hormonales no se han descrito cambios a partir de reducciones de 6 días (Mújika *et al*/2001) o 4 semanas (Houmard *et al*/1990b)

Ningún estudio parece haber hallado modificaciones en la composición corporal.

Otros

La figura 3.6.1 resume el conocimiento actual sobre las estrategias de *tapering* más favorables expuestas a lo largo de este apartado.

Figura 3.6.1

Resumen de las estrategias de *tapering* que parecen más favorables

- Duración de entre 1 y 2 semanas habitualmente.
- Más importante conforme la acumulación de carga de entrenamiento es mayor y la distancia de competición más larga
- Reducción en la última semana a un 25-40% del volumen medio en semanas anteriores al inicio del tapering
- Intensidad y Frecuencia deben ser elevadas
- Preparando maratón o ultramaratón, semana de mayor volumen a 5 semanas de la competición, y último día más duro a 9 días de la competición
- Debe probarse individualmente en competiciones secundarias

El estudio de las estrategias de *tapering* tiene un fin eminentemente práctico. Por ello, de cara a las aplicaciones de estos estudios, es importante destacar que la mayoría de trabajos se han realizado con corredores de medio nivel (por ejemplo corredores de 5000m de alrededor de 16 min 30 s a 16 min 50 s en Wittig *et al*/1992 y Mc Conell *et al*/1993, 16 min 40 s en Houmard *et al*/1990a y Wittig *et al*/1989 o 17 min en Houmard *et al*/1994). Solo algunos trabajos han estudiado corredores de mayor nivel (alrededor de 2 min 3 s en 800 en Mújika *et al*/2000, 4 min 10 s en 1500 en Shepley *et al*/1992, o 35 min 45 s en 10kms en Berg 1989), y apenas corredores de alto nivel (32 min 25 s en 10km en Houmard *et al*/1989).

Sabemos pues formas de realizar dichos *tapers* con éxito fijando por completo uno o dos factores. Queda pendiente conocer si existen combinaciones mejores, y discriminarlas en función del nivel de rendimiento, ya que se ha estudiado poco en sujetos de alto nivel.

En el delicado diseño de estas reducciones de entrenamiento, cabe recordar que los beneficios del *taper* son, sin embargo, transitorios, y un mayor tiempo de reducción del entrenamiento iniciará la reversibilidad de los efectos del entrenamiento (Bosquet *et al* 2007, Mújika y Padilla 2000)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ESTE APARTADO:

- Banister EW, Carta JB, Zarpadas PC. Training theory and taper: validation in triatlón athletes. *Eur J Appl Physiol* 1999;79:182-191.
- Berg K, Olsen R, McKinney M, Hofschire P, Latin R, Bell W. Effect of reduced training volume on cardiac function, VO_2 max, and running performance. *J Sports Med Phys Fitness* 1989;29:245-252.
- Berger BG, Motl RW, Butki BD, Martin DT, Wilkinson JG. Mood and cycling performance in response to three weeks of high-intensity, short-duration overtraining, and two-week taper. *Sport Psicol* 1999;13:444-457.
- Bosquet L, Montpetit J, Arvisais D, Mújika I. Effects of tapering on performance: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39:1358-1365
- Busso T, Candau R, Lacour JR. Fatigue and fitness modelled from the effects of training on performance. *Eur J Appl Physiol* 1994;69:50-54.
- Costill DL, King DS, Thomas R, Hargreaves M. Effects of reduced training on muscular power in swimmers. *Phys Sports Med* 1985;13:91-101.
- Crossman J, Jamieson J, Henderson L. Responses of competitive athletes to ay-offs in training: exercise addiction or psychological relief? *J Sports Behav* 1987;10:28-38.
- Daniels JT. Comunicación Personal USSF Coaches Seminar. Salt Lake City, 2006.
- Fitz-Clarke JR, Morton RH, Banister EW. Optimizing athletic performance by influence curves. *J Appl Physiol* 1991;71:1151-1158.
- Gibala MJ, MacDougall JD, Sale Dg. The effects of tapering on strength performance in trained athletes. *Int J Sports Med* 1994;15:492-497.
- Hooper SL, Mackinnon LT, Howard A. Physiological and psychometric variables for monitoring recovery during tapering for major competition. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:1205-1210.
- Houmard JA, Scott BK, Justice CL, Chenier TC. The effects of taper on performance in distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 1994;26:624-631.
- Houmard JA, Johns RA. Effects of taper on swim performance. Practical implications. *Sports Med* 1994;14:224-232.
- Houmard JA, Hortobagyi T, Johns RA, Bruno NJ, Nute CC, Shinebarger MH, Welborn JW. Effect of short-term training cessation on performance measures in distance runners. *Int J Sports Med* 1992;13:572-576.
- Houmard JA. Impact of reduced training on performance in endurance athletes. *Sports Med* 1991;12:380-393.
- Houmard JA, Costill DL, Mitchell JB, Park SH, Hickner RC, Roemmich JN. Reduced training maintains performance in distance runners. *Int J Sports Med* 1990a;11:46-52.
- Houmard JA, Costill DL, Mitchell JB, Park SH, Fink WJ, Burns JM. Testosterone, cortisol, and creatine kinase levels in male distance runners during reduced training. *Int J Sports Med* 1990b;11:41-45.
- Houmard JA, Kirwan JP, Flynn MG, Mitchell JB. Effects of reduced training on submaximal and maximal running responses. *Int J Sports Med* 1989;10:30-33.
- Johns RA, Houmard JA, Kobe KW, Hortobagyi T, Bruno NJ, Wells JM, Shinebarger MH. Effects of taper on swim power, stroke distance, and performance. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:1141-1146.

- McConnell GK, Costill DL, Widrick JJ, Hickey MS, Tanaka H, Gastin PB. Reduced training volume and intensity maintain aerobic capacity but not performance in distance runners. *Int J Sports Med* 1993;14:33-37.
- Morton RH. The quantitative periodisation of athletic training: a model study. *Sports Med Train Rehabil* 1991;3:19-28.
- Morton RH, Fitz-Clarke JR, Banister EW. Modeling human performance in running. *J Appl Physiol* 1990;69:1171-1177.
- Mújika I, Goya A, Ruiz E, Grijalba A, Santisteban J, Padilla S. Physiological and performance responses to a 6-day taper in middle-distance runners: influence of training frequency. *Int J Sports Med* 2002;23:367-373.
- Mújika I, Padilla S. Detraining: loss of training-induced physiological and performance adaptations. Part I. Short term insufficient training stimulus. *Sports Med* 2000;30:79-87.
- Mújika I, Goya A, Padilla S, Grijalba A, Gorostiaga E, Ibanez J. Physiological responses to a 6-d taper in middle-distance runners: influence of training intensity and volume. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:511-517.
- Mújika, I. The influence of training characteristics and tapering on the adaptation in highly trained individuals: a review. *Int J Sports Med* 1998;19:439-446.
- Mújika I, Chatard JC, Busso T, Geysant A, Barale F, Lacoste L. Effects of training on performance in competitive swimming. *Can J Appl Physiol* 1995;20:395-406.
- Neufer PD. The effect of detraining and reduced training on the physiological adaptations to aerobic exercise training. *Sports Med* 1989;8:302-321.
- Neufer PD, Costill DL, Fielding RA, Flynn MG, Kirwan JP. Effect of reduced training on muscular strength and endurance in competitive swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 1987;19:486-490.
- Noakes T. *Lore of Running (4thed)*. Human Kinetics, Champaign-IL, 2003.
- Raglin JS, Koceja DM, Stager JM, Harms CA. Mood, neuromuscular function, and performance during training in female swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 1996;28:327-377.
- Shepley B, MacDougall JD, Cipriano N, Sutton JR, Tarnopolsky MA, Coates G. Physiological effects of tapering in highly trained athletes. *J Appl Physiol* 1992;72:706-711.
- Smith DJ. A framework for understanding the training process leading to elite performance. *Sports Med* 2003;33:1103-1126.
- Wittig AF, McConnell GK, Costill DL, Schurr KT. Psychological effects during reduced training volume and intensity in distance runners. *Int J Sports Med* 1992;13:497-499.
- Wittig AF, Houmard JA, Costill DL. Psychological effects during reduced training volume and intensity in distance runners. *Int J Sports Med* 1989;10:97-100.

1.10.- La Periodización del Entrenamiento en Carreras de Fondo

Pese a todos los avances en equipamiento, vestimenta, nutrición y dopaje, el entrenamiento sigue siendo el factor externo que más puede influir en el rendimiento (Rowbottom 2000). A partir de una predisposición genética necesaria, el rendimiento máximo es resultado de un proceso de entrenamiento a largo plazo, y se asume que la distribución de objetivos y contenidos a corto y medio plazo favorece su organización sistemática (Bompa 1999).

Aunque es difícil establecer quién inventó el concepto de periodización, pues como vimos en el apartado 1.4, ya en la Antigua Grecia existía un modo de organización del entrenamiento, parece que modernamente fueron los soviéticos, a partir de Matveiev en los años 50 y 60, quienes desarrollaron los conceptos actuales de la periodización del entrenamiento (Hegedüs 1984).

Aunque muchos de estos autores soviéticos han hecho referencia a "investigaciones científicas", apenas nada de las mismas ha trascendido a las publicaciones científicas occidentales, se muestran de forma empírica, y parte de los resultados deportivos de sus deportistas se vislumbran en la sombra del dopaje.

Considerando que la diferencia de marcas entre el campeón del mundo y el eliminado en series clasificatorias puede ser habitualmente de un 1-2%, sorprende que exista tan poca bibliografía científica apoyando o refutando las prácticas de los entrenadores (Rowbottom 2000).

"Periodizar" supone tanto la división de las de la temporada en ciclos de diversa duración unos dentro de otros, como la estructuración dentro de los mismos de los contenidos de entrenamiento, como señala otro de sus pioneros modernos (Bompa 1999).

En este apartado nos ceñiremos a explicar las evidencias científicas de la periodización a largo plazo de las carreras de fondo. Se emplaza al lector a la consulta de los numerosos manuales técnicos de entrenamiento para mayor detalle de las propuestas empíricas de los entrenadores, que no son motivo de esta Tesis Doctoral. Tampoco lo son la terminología específica

sobre el tema, los modelos de periodización, o los principios del entrenamiento.

Desde este punto de vista científico, y reproduciendo palabras de otros autores, *"La periodización es el principal ejemplo de una teoría que, sin soporte científico directo, ha sido adoptada por entrenadores y deportistas en numerosos deportes"* (Rowbottom 2000) ... *"la disponibilidad de investigación al respecto es lamentable"* (Rowbottom 2000), y *"la mayor parte de la información en la literatura (...) son conjeturas o experiencias no avaladas por la investigación"* (Fry et al 1992). Ciertamente es difícil hallar estudios de entrenamiento de más de 8-10 semanas de intervención, especialmente aplicando modelos de periodización claramente diferenciados y controlados.

Por ello, en este apartado, lejos de detallar el entrenamiento anual del corredor, a lo que el título puede llevar a engaño, nos ceñimos a abordar aquellos aspectos en los que se han estudiado propuestas controladas de organización del entrenamiento, en búsqueda de los óptimos necesarios. Sin embargo, como no puede ni debe evitarse, se hace referencia a propuestas de diversos entrenadores y corredores destacados, pues al fin y al cabo son quienes han hecho avanzar el rendimiento, aunque a veces de forma poco eficiente y controlada.

Duración de la preparación y sus ciclos

Actualmente, los calendarios de competición, a todos los niveles, son mucho más densos que hace años y décadas. Esto ha forzado la necesidad de los corredores de desarrollar frecuentemente un nivel alto de forma, y supone una serie de dificultades para la periodización del entrenamiento (Navarro y García-Verdugo 2003).

La duración de una preparación depende lógicamente de la previa acumulación y continuidad de entrenamiento, tanto reciente como acumulada con los años, y de los compromisos de competición de la presente temporada.

Asumiendo una continuidad de entrenamiento y la posibilidad de

seleccionar con tiempo el inicio del entrenamiento previo a la competición más importante, observamos que las propuestas de los entrenadores-investigadores son bastante parecidas (ver figura 1.10.1).

Los mínimos van desde las 12-14 semanas (si se pretende simplemente terminar, alternando caminar con correr, o bien si se es experto y se tiene mucha base reciente), hasta las 26-30, si se necesita crear bastante base, siendo la parte principal de 18 semanas habitualmente (Daniels 2006, Noakes 2003, Péronnet *et al* 2001).

Figura 1.10.1
Duración de la preparación para Maratón según diversos programas
(A partir de Daniels 2006. Noakes 2003 y Péronnet *et al* 2001)

	Base previa adicional	mínimo
Liberman	12	
Henderson	14	
Péronnet et al	18	(+8) 13,5
Daniels	18	(+6)
Noakes	20	(+10-12)
Galloway	26	

Aunque la figura 1.10.1 se refiere a preparaciones de maratón, estas duraciones no parecen distintas en los programas propuestos como óptimos para 10km o 1/2 maratón, distancias que suelen así mismo prepararse, como veremos, "de camino" al maratón (Noakes 2003, Péronnet *et al* 2001).

Al margen del nivel del corredor, si se buscan diversos picos de forma en una misma temporada (2 o 3 por lo general), se recomienda una primera puesta a punto más larga y un mínimo de 8 semanas, si el calendario lo permite, entre 2 puestas a punto distintas en la temporada (Péronnet *et al* 2001).

De no ser así es preferible englobarlas en la misma preparación, subordinando en parte la primera respecto a la segunda, algo que también se hace en preparaciones largas orientadas al maratón, con competición previa en la temporada de campo a través o 10000 (Navarro y García-Verdugo 2003).

La duración de los principales ciclos de entrenamiento depende, además de las fechas de las competiciones principales, del modelo de periodización. Sin embargo, los autores coinciden en señalar que la naturaleza de las adaptaciones de la resistencia aeróbica requiere de tiempo suficiente, más que otras cualidades, y por ello una buena base progresiva de entrenamiento y cierta duración de cada etapa son fundamentales (Navarro y García-Verdugo 2003, Péronnet *et al* 2001).

Por ello, en las preparaciones largas con vistas al maratón, a priori los modelos tradicionales parecen más adaptables, si bien esto no excluye la inclusión o combinación de los modelos contemporáneos de cargas concentradas. Así mismo en temporadas con un primer macrociclo largo y otros cortos o una larga época sin competiciones y otra con frecuente competición, casos en los que la primera parte podría ser de tipo tradicional y las siguientes preferiblemente contemporáneas (Navarro y García-Verdugo 2003).

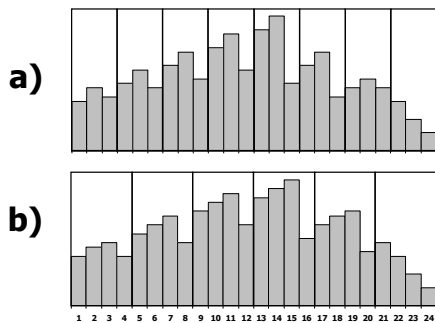
Distribución óptima de las cargas de entrenamiento

Desde los años setenta se han desarrollado modelos teóricos matemáticos para calcular la combinación óptima de entrenamiento y recuperación para el rendimiento máximo (Rowbottom 2000). Por ejemplo, el modelo de Fitz-Clarke y colaboradores (1991) mostraba que el entrenamiento de las semanas 6 previas a la competición tenía el mayor efecto, si bien no en los últimos 12-14 días, lo que coincide con los trabajos sobre del *tapering* (apartado 1.9), sugiriendo un mesociclo final tipo "4:2". En corredores populares un modelo pronosticó mejor rendimiento por una distribución de la carga en mesociclos 3:1 (Morton 1991), algo que es habitual en los fondistas, así como la distribución 2:1, también propuesta por la literatura científica (Péronnet *et al* 2001) (figura 1.10.2).

Estudios experimentales apoyan claramente el concepto de que los programas deben presentar alternancia en la carga de entrenamiento, entre las sesiones y entre las semanas, evitando la monotonía, para

producir adaptaciones positivas y evitar el sobreentrenamiento (Foster *et al* 1998). Así mismo la corriente de la Teoría de los Sistemas Dinámicos Complejos apuesta por esa alternancia y variedad continua como una de sus aplicaciones al entrenamiento (Torrents 2005)

Figura 1.10.2
Ejemplo de la distribución de la carga en mesociclos 2:1 (a) o 3:1 (b)



Otras observaciones de modelos matemáticos teóricos han mostrado que los modelos de carga periodizada siempre muestran mayores mejoras en el rendimiento máximo de la temporada (con diferencias de un 3-5%) (Rowbottom 2000), aunque este es el tipo de trabajos que falta por demostrar en situaciones reales, en programas de larga duración, modificando los contenidos y/o secuencias de entrenamiento, distribución de intensidades, etc.

Evolución óptima de volumen e intensidad

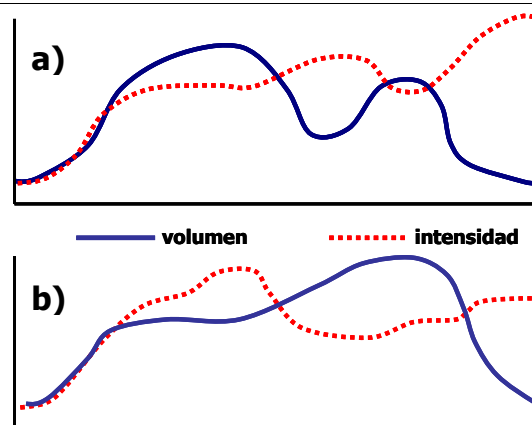
Dada la comentada naturaleza alternante de la carga, estas variables de volumen e intensidad no pueden mantenerse constantes, ni deben hacerlo, de cara a poder estimular adecuadamente las diversas adaptaciones requeridas. El modelo más tradicional de periodización del entrenamiento en este sentido, propuesto por Matveiev en 1950, propone que, salvo en el inicio de temporada, éstas no pueden incrementarse al mismo tiempo. Además, propone un énfasis inicial en el volumen, que disminuye a partir de la mitad de la preparación, donde alcanza el máximo pico semanal, para ceder entonces el

protagonismo a la intensidad, que se eleva hasta el final del macrociclo. Con posterioridad, Matveiev corrige el citado modelo (G^a-Manso *et al* 1996) porque parece ser que una eliminación del volumen tan prematura no permitía alcanzar un óptimo rendimiento posterior. Así, en la fase pre-competitiva, vuelve a elevar el volumen, aunque en menor medida, para finalmente volver a elevar la intensidad, más allá que antes (G^a-Manso *et al* 1996) (figura 1.10.3a).

Esta distribución "volumen a intensidad" puede ser todavía hoy día útil para pruebas como los 10km o el cross. Sin embargo, los programas de maratón habitualmente reconocidos presentan un desarrollo aparentemente opuesto ("intensidad a volumen"), como puede verse en la figura 1.10.3b, debido a que la menor intensidad fisiológica relativa, y con ello a la especificidad de la secuencia del entrenamiento, como posteriormente se explica.

Para las pruebas de mediofondo se ha sugerido una progresión mixta, de incremento de ambos, para finalizar con descenso de volumen y muy alta intensidad (Navarro y García-Verdugo 2003) Lógicamente, ésta es una síntesis muy matizable y que se personaliza en la práctica en función de la prueba, nivel del corredor y calendario de competición.

Figura 1.10.3
Simplificación de la evolución de Volumen e Intensidad según a) Evolución Volumen e Intensidad del modelo de Matveiev para pruebas de resistencia y b) la tendencia moderna en maratón



Otras dos cuestiones importantes son saber en qué semana debe alcanzarse el pico máximo de volumen en cada caso, y cuánto debe ser éste en función de la prueba y nivel del corredor, así como la intensidad alcanzada.

Respecto a la intensidad a alcanzar según la prueba esto depende básicamente de la intensidad fisiológica promedio de la competición, que puede ser bien distinta según el nivel. Por ejemplo en maratón ronda desde el 83% del VO₂max en los corredores masculinos de elite (Péronnet y Thibault (1989) al 73% para los que hacen 2 h 45 min, o 64% para 3 h 35 min (O'Brien *et al* 1993).

El Máximo Kilometraje Semanal (que llamaremos MKS), se sitúa alrededor de la mitad del macrociclo o un poco antes o después según los modelos de Matveiev (Ga-Manso *et al* 1996).

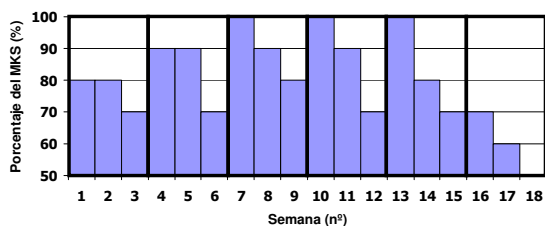
En el caso del maratón, esta localización cobra mucha más importancia, porque dicho pico es mayor, y porque se encuentra más cerca de la competición, y se requiere de cierto tiempo para su recuperación y asimilación.

Parece que habitualmente se sitúa a 6 (Daniels 2006) o 5 semanas de la competición o máximo 3 en caso de una preparación precipitada (Péronnet *et al* 2001).

Además, como curiosidad, el programa de Daniels realiza las semanas de mayor kilometraje en la primera semana de cada mesociclo de 3 semanas, en la parte media-final de la preparación (semanas 7 a 15, figura 1.10.4. Compárese con la forma de los mesociclos de la figura 1.10.2a).

Figura 1.10.4

Evolución del % del MKS en el programa para maratón de Daniels (2006)



Respecto al MKS, los corredores de menor nivel tienen mayor dependencia del entrenamiento suave, debido a que su

intensidad de competición es más cercana. Sin embargo, los corredores de elite realizan unos MKS muy superiores a los populares. Los motivos para ello son: que es preferible su organización de entrenamiento por tiempo en vez de distancia (porque corren mucho más despacio que los de elite en un determinado tiempo a la misma intensidad fisiológica), que disponen de menor tiempo de entrenamiento, y que toleran menor carga de entrenamiento.

Como referencias del maratón, la actual *recordwoman* mundial, pese a que defiende que el entrenamiento de volumen no debe comprometer en entrenamiento de calidad, ha llegado a realizar hasta 250 km semanales preparando sus últimos maratones (Jones 2006). No parece que los corredores masculinos actuales realicen más volumen que esos (parece que Tergat y Gebreselassie hasta los 180-200 km) (Gouldthorp 2004). La figura 1.10.5 muestra estos y otros datos de maratonianos/as famosos.

Figura 1.10.5

MKS de referencia de varios/as maratonianos/as de elite (a partir de datos de Jones 2006, Gouldthorp 2004 y Noakes 2003)

Dave Bedford	320	Haile Gebreselassie	200
Paula Radcliffe	250	Paul Tergat	180
Ron Hill	250	Clarence de Mar	160
Robert de Castella	230	Grete Waitz	160
Fabián Roncero	230	Steve Jones	160

Aunque se ha sugerido que más de 100 kilómetros semanales de media ofrecen especiales beneficios en la economía (Scrimgeour *et al* 1986), no se ha demostrado que más de 120 kilómetros semanales aporten mayores beneficios (Noakes 2003), si bien lógicamente es difícil estudiar esto de forma experimental, pues sería complicado encontrar corredores capaces y dispuestos.

Corredores que hicieron mucho más, como Ron Hill, sin beneficio aparente, indicaron que posiblemente no sea necesario más de 190-210 (Noakes 2003).

Por tanto, dichos MKS de ~200 pueden ser óptimos en la elite, y las recomendaciones para el resto de atletas estarían entre los 60 y los 120 km respectivamente, entre el nivel bajo y el alto, respectivamente

(Péronnet *et al* 2001). Aunque solo sea por aproximación matemática, para marcas de "muy alto nivel", pero no elite (por ejemplo 2 horas (h) 20 min 2 h 30 min en hombres o 2 h 35 min a 2 h 45 min en mujeres), quizá unos 150-160 km sean un MKS límite.

Uno de los entrenadores citados, Henderson, acuñó las siglas "LSD" en referencia a las sesiones suaves de larga duración preparando una maratón ("*Long Show Distance*").

Parece que un máximo de 2 h o 2,5 h son habituales. Daniels (2006) propone 2,5 h, otros recomiendan completar los 42 kilómetros entre andar y correr para principiantes en la distancia (Jeff Galloway), y por el contrario varios grandes maratonianos como Carlos Lopes o Antonio Serrano no pasaron de 2 h, (aunque para ellos esto supone unos 35 km) (Noakes 2003, Serrano 2001).

Distribución óptima de la intensidad

En el apartado 3.3 quedó clara la importancia del volumen. Noakes, citado en diversos apartados, aparte de investigador ha sido corredor (con 2 h 50 min en maratón y menos de 7 h en 90 km como marcas más destacadas). Pese a entrenarse a sí mismo con un planteamiento casi exclusivo de baja intensidad, reconoce que dicha distribución, pese a ser muy segura (si no se hacen incrementos bruscos del volumen y se guardan regeneraciones periódicas), puede que no sea la mejor forma de entrenar, incluso para ultramaratón.

Al igual que Bannister (el primer corredor que superó la barrera de los 4 minutos en la milla), señala que este entrenamiento casi exclusivo de gran volumen posiblemente sirva para mejorar la velocidad de recuperación del atleta, pero no tanto la velocidad de carrera (Noakes 2003).

En el extremo opuesto, la frase de Zatopek es significativa: "*¿Por qué habría que entrenar a ritmo lento? Ya sé correr a ritmo lento. Debo aprender a correr a ritmo rápido (...). Hay que ser suficientemente rápido y tener resistencia. Por eso se corre rápido, para mejorar la velocidad, y se repite muchas veces, para adquirir*

resistencia" (Hawley y Burke 2000). En esta línea podríamos situar la propuesta de Hoff (2006), que se avanzó en el apartado 3.4, y que se amplía posteriormente.

Muchos entrenadores, especialmente los modernamente partidarios del modelo ATR (Acumulación-Transformación-Realización), insisten en la diferencia entre deportistas de alto nivel respecto a la elite en cuanto a la necesidad de concentrar las cargas de entrenamiento sobre uno o pocos contenidos de cara a generar estímulos eficaces para estos deportistas expertos y de gran nivel.

Una cuestión de gran interés, todavía sin resolver, es conocer cual es la distribución óptima de la intensidad de los esfuerzos en un ciclo de entrenamiento. Aunque existen en la literatura trabajos que describen algunas de las características del entrenamiento de los corredores de elite (Billat *et al* 2003, Saltin *et al* 1995, Coetzer *et al* 1993), especialmente de atletas africanos, la mayoría se han hecho por medio de cuestionarios, lo que supone un método con limitaciones.

Un primer trabajo de medición directa de la intensidad del entrenamiento en corredores de buen nivel, (marcas promedio de 3 min 53 s en 1500, 14 min 29 s en 5000 y 30 min 47 s en 10k, entre otras), estudió la intensidad media de los entrenamientos, que resultó ser del 64% del VO₂max o 73% de la FCmáx, y 15,6 km/h (Robinson *et al* 1991). Pero el promedio de intensidad no es un dato relevante para la organización del entrenamiento, pues puede lograrse tanto con un entrenamiento monótono como muy dispar en la intensidad de las sesiones.

Lo interesante, por ejemplo, es conocer qué porcentajes del total del tiempo debe representar la baja, moderada o alta intensidad.

En este sentido, diversos trabajos muestran la predominancia del entrenamiento suave. Se viene utilizando una forma sencilla para discriminar las principales zonas de intensidad, en un modelo trifásico, con diversas metodologías que están alrededor de los dos umbrales "aeróbico" y "anaeróbico".

La práctica de un mayoritario uso del entrenamiento de baja intensidad se

observa en trabajos científicos de carácter descriptivo con alto nivel o elite en diversos deportes cíclicos de resistencia, como el ciclismo (Lucía *et al* 2003, Lucía *et al* 2000, Lucía *et al* 1999), el remo (Fiskestrand y Seiler 2004, Steinacker *et al* 1998), el esquí de fondo (Seiler y Kjerland 2006) o las pruebas de carrera como el maratón (Billat *et al* 2001)

Foster y colaboradores (1996) estimaron a partir de la percepción de esfuerzo (RPE) y acumulación de lactato un 75% de entrenamiento de baja intensidad en ciclistas y patinadores de velocidad.

El grupo de Lucía describió que el entrenamiento preparatorio de los ciclistas profesionales de ruta suponía una distribución total de los esfuerzos de tipo 75/15/10 suave/moderado/intenso según el modelo trifásico delimitado por los umbrales ventilatorios 1 y 2 (Lucía *et al* 2000) y una gran vuelta por etapas alrededor de 70/23/7 (Lucía *et al* 2003, Lucía *et al* 1999).

Un trabajo de Seiler y Kjerland (2006), con esquiadores de fondo júnior noruegos de elite, mostró una distribución alrededor de 75/5/20 en los porcentajes de entrenamiento suave, moderado e intenso respectivamente, siendo estimada la intensidad con mediciones de RPE, lactato y FC. Comparando esta distribución natural descriptiva con las recomendaciones del ACSM, los autores sugerían que para deportistas de nivel bajo o medio, o con poco tiempo para entrenar, es preferible dicha distribución, que llamaron "tradicional", que hace énfasis en la zona II, mientras que para el alto nivel o élite, sería mejor la distribución que llamaron "polarizada", es decir, todo el entrenamiento posible en zonas I y III, y el mínimo en zona II.

Curiosamente, otro trabajo descriptivo, con cuestionarios, sobre el entrenamiento de maratonianos franceses y portugueses de elite (2 h 06 min a 2 h 10 min de marca), mostró una distribución "polarizada" de la distancia cubierta en entrenamiento a ritmos inferiores, iguales o superiores al ritmo de maratón (78/4/18) (Billat *et al* 2001)

Aunque pueda parecer contrario al principio de la especificidad, hay que entender que en la resistencia no es posible dedicar una parte mayoritaria al entrenamiento intenso, pues a poco que se haga un volumen de trabajo suave siempre comportará más tiempo, y ya se han indicado anteriormente los efectos positivos del volumen de entrenamiento, que puede aumentarse más fácilmente con intensidad baja.

Son necesarios, sin embargo, más estudios al respecto. Son cuestiones por resolver, desde trabajos experimentales, conocer si existe una proporción límite de entrenamiento intenso tolerable, cuál es el óptimo, y si la posibilidad de acumular intensidad puede ser en parte un problema de innovación de métodos y periodización de entrenamiento.

En cualquier caso, parece que las necesidades de los corredores de elite o alto nivel son distintas que las de aquellos de nivel medio o bajo.

Distribución óptima de contenidos

Otro elemento clave en la periodización es la llamada "secuencialidad" de la programación de contenidos (Navarro y García-Verdugo 2003). El volumen y la intensidad se modifican durante la temporada, puede que la proporción general de trabajo suave/moderado/intenso en menor medida, pero es habitual que los medios y métodos de entrenamiento y las intensidades principales de desarrollo cedan su protagonismo a lo largo de la preparación, con una jerarquía basada en la especificidad.

Todos los modelos de periodización, pese a su disparidad aparente, comulgan en este principio, con ciertas adaptaciones más o menos restringidas a un número limitado de contenidos o a una progresiva predominancia (G^a-Manso *et al* 1996)

Una excepción relativa a muchas cuestiones anteriormente expuestas puede ser el polémico planteamiento de Hoff, al que hemos hecho referencia en el apartado 1.7 y anteriormente en este punto. Contrariamente a lo que puede parecer, trabaja todos los factores del rendimiento, pues además del VO₂max y la economía,

las moderadas cuestas (3-4% de pendiente) hacen que la velocidad desarrollada, en la práctica, sea alrededor del umbral anaeróbico, y con ellas está trabajando la resistencia muscular específica del gesto deportivo. Su periodización, además, no es tan simplista, pues estos bloques se realizan durante un máximo de 3 semanas, tras una base más tradicional, y se alternan con otros mesociclos de 2-4 semanas más regulares, trabajando ritmos de competición con 4-5 sesiones de intervalos semanales en pista y 2-3 de fuerza máxima (4x4RM) descrita en el apartado 1.7. La tolerancia a las duraciones específicas de competición las logra incluyendo competiciones relativamente frecuentes, aprovechando la exigencia moderna en este sentido, en las que sus deportistas a menudo participan a ritmos pautados, sin esfuerzos máximos, salvo en las competiciones clave. Lo que sí está claro es que evitan, llegado cierto nivel de rendimiento u tras una fase inicial de la temporada, los grandes volúmenes de entrenamiento (Hoff 2006).

Como indica Verjoshanski (1997), el entrenamiento de volumen y de preparación de fuerza debe preceder al incremento del entrenamiento de velocidad a ritmos de competición. A su vez es precisa una base previa aeróbica afianzada para la prevención y mejor recuperación, (Kutnetsov 1981). Esta premisa parece común en las periodizaciones de los entrenadores de fondistas.

Posteriormente se ha demostrado que las mejoras en fuerza son superiores tras una base de resistencia (Hunter *et al* 1987), y que a partir de ahí, parece que son necesarias varias sesiones semanales para desarrollar la fuerza (Sorichter *et al* 1997).

En los últimos años se ha crecido el interés en evaluar diferentes tipos de periodización del entrenamiento de fuerza. Se ha demostrado que los programas periodizados son más efectivos que los no periodizados (Peterson *et al* 2005, Fleck 1999). Por lo que respecta a las relaciones con el entrenamiento de la fuerza-resistencia, cabe indicar que se le ha prestado poca atención. Rhea y colaboradores (2003) mostraron que para la fuerza resistencia es más efectivo entrenar con cargas progresivamente

decrecientes a lo largo de las semanas que con cargas crecientes u ondulantes, (si bien no eran deportistas de resistencia). Como ya se indicó en el apartado 1.7, es necesario investigar la secuenciación de los ejercicios que se han demostrado útiles para la mejora del rendimiento en carrera de fondo.

También se ha visto que cuando se deja de entrenar la fuerza y sólo se entrena la resistencia, las ganancias en fuerza son mantenidas en parte (Bell *et al* 1991).

Así mismo Verjoshanski (1997) recalca que el desarrollo de la velocidad, como la capacidad y potencia lácticas, deben dosificarse para no solicitar en exceso y de forma prolongada al organismo, y que es básico previamente desarrollar las adaptaciones vasculares periféricas y de preparación especial muscular y técnica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ESTE APARTADO:

American College of Sports Medicine. Position Stand: The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:975-991.

Bell GJ, Petersen SR, Wessel J, Bagnall K, Quinney HA. Adaptations to endurance and low velocity resistance training performed in a sequence. *Can J Applied Sport Sci* 1991;16:186-192.

Billat V, Lepetre PM, Heugas AM, Laurence MH, Salim D, Korzstein JP. Training and bioenergetic characteristics in elite male and female Kenyan runners. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35:297-304.

Billat VL, Demarle A, Slawinski J, Paiva M, Korzstein JP. Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:2089-2097.

- Bompa T. Periodization: Theory and methodology of training. Human Kinetics, Champaign, IL 1999.
- Coetzer P, Noakes TD, Sanders B, Lambert MI, Bosch AN, Wiggins T, Dennis SC. Superior fatigue resistance of elite black South African distance runners. *J Appl Physiol* 1993;75:1822-1827.
- Daniels J. Comunicación personal. USSF Coaches Seminar. Salt Lake City 2006.
- Fiskestrand A, Seiler KS. Training and performance characteristics among Norwegian international elite rowers 1970-2001. *Scand J Med Sci Sports* 2004;14:303-310.
- Fitz-Clarke JR, Morton RH, Banister EW. Optimizing athletic performance by influence curves. *J Appl Physiol* 1991;71:1151-1158.
- Fleck S. Periodized strength training: A critical review. *J Strength Cond Res* 1999; 13:82-89.
- Foster C. Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Med Sci Sports Exerc* 1998; 30:1164-1168.
- Foster C, Daines E, Hector L, Snyder AC. Athletic performance in relation to training load. *Wis Med J* 1996;95:370-374.
- Fry RW, Morton AR, Keast D. Periodisation of training stress: a review. *Can J Sports Sci* 1992;17:234-240.
- G^a Manso JM, Navarro F, Ruiz R. Planificación del entrenamiento deportivo. Gymnos, Madrid 1996.
- Gouldthorp T. Training of the champions. <http://members.iinet.net.au/~peterq1/run/aths.html> 2004.
- Hawley J, Burke L. Rendimiento deportivo máximo. Paidotribo, Barcelona 2000.
- Hegedüs J. La ciencia del entrenamiento deportivo. Stadium, Buenos Aires, 1984.
- Hoff J. Comunicación personal. International Conference on Strength Training, Odense 2006.
- Hunter G, Demment R, Miller D. Development of strength and maximum oxygen uptake during simultaneous training for strength and endurance. *J Sports Med and Phys Fitness* 1987;27:269-275.
- Jones AM. The physiology of the World Record Holder for the Women's Marathon. *Int J Sports Sci and Coaching* 2006;1:101-116.
- Kutnetsov VV. Preparación de fuerzas en los deportistas de las categorías superiores. Editorial Orbe, Ciudad de La Habana, 1981.
- Lucía A, Hoyos J, Carvajal A, Chicharro JL. Heart rate response to professional road cycling: The Tour de France. *Int J Sports Med* 1999;20:167-172.
- Lucía A, Hoyos J, Pardo J, Chicharro JL. Metabolic and neuromuscular adaptations to endurance training in professional cyclists: A longitudinal study. *Jpn J Physiol* 2000;50:381-388.
- Lucía A, Hoyos J, Santalla A, Earnest C, Chicharro JL. Tour de France vs Vuelta a España: Which is harder? *Med Sci Sports Exerc* 2003;35:872-878.
- Morton RH. The quantitative periodisation of athletic training: a model study. *Sports Med Train Rehabil* 1991;3:19-28.
- Navarro F, García-Verdugo M. Apuntes Máster en Alto Rendimiento Deportivo UAM-COES, módulo 2.5. , capítulo 3, 2003.
- Noakes T. Lore of Running (4^aed). Human Kinetics, Champaign-IL, 2003.
- O'Brien MJ, Viguie CA, Mazzeo RS, Brokks GA. Carbohydrate dependence during marathon running. *Med Sci Sports Exerc* 1993;25:1009-1017.
- Péronnet F (coord) Maratón. INDE, Barcelona 2001.
- Péronnet F, Thibault G. Mathematical analysis of running performance and world running records. *J Appl Physiol* 1989;67: 453-465.

Peterson MK, Rhea MR, Alvar BA. Applications of dose-response for muscular strength development: a review of meta-analytic efficacy and reliability for designing training prescription. *J Strength Cond Res* 2005;19: 950-958.

Rhea MR, Phillips WT, Burkett LN, Stone WJ, Ball SD, Alvar BA, Thomas BA. A Comparison of Linear and Daily Undulating Periodized Programs With Equated Volume and Intensity for Local Muscular Endurance. *J Strength Cond Res* 2003;17:82-87.

Robinson DM, Robinson SM, Hume PO, Hopkins WG. Training intensity of elite male distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 1991;23:1078-1082.

Rowbottom DG. Periodization of Training. EN: Garret WE, Kierkendall DT. *Exercise and Sport Sciences*, pp. 499-512. Lippincott, Williams & Wilkins, Philadelphia 2000.

Saltin B, Larsen H, Terrados N, Bangsbo J, Bak T, Kim CK, Svedenhag J, Rolf CJ. Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports* 1995;5: 209-221.

Scrimgeour AG, Noakes TD, Adams B, Myburgh K. The influence of weekly training distance on fractional utilization of maximum aerobic capacity in marathon and ultramarathon runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1986;55:202-209.

Seiler KS, Kjerland GØ. Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an "optimal" distribution? *Scand J Med Sci Sports* 2006;16:49-56.

Serrano A. No soy un maratoniano maniático. EN: Varona A, Serrano A. *Filípides existe: los secretos de la preparación de los maratonianos de elite*. Alianza, Madrid 2001.

Sorichter S, Mair J, Koller A, Secnik P, Parrak V, Haid C, Muller E, Puschendorf B. Muscular adaptation and strength during the early phase of eccentric training: Influence of the training frequency. *Med Science Sports Exerc* 1997;29:1646-1652.

Steinacker JM, Lormes W, Lehmann M, Altenburg D. Training of rowers before world championships. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:1158-1163.

Torrents C. La teoría de los sistemas dinámicos y el entrenamiento deportivo. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona, 2005.

Verchoshanskij JV. Un nuovo sistema di allenamento negli sport ciclici. *Sds* 1997;27: 33-45.

1.11.- El Control del Entrenamiento y sus progresos

En este último apartado de la introducción, trataremos diversos aspectos claves tanto para el control del entrenamiento realizado como para la evolución de los progresos en los factores determinantes del rendimiento. El rendimiento es multifactorial, y por ello no hablamos de control del rendimiento, sino de la evolución fisiológica.

Tests de rendimiento

Lógicamente, a estas alturas, se hace referencia a muchos aspectos que ya han sido tratados. Así mismo remitimos al lector a la consulta de la enorme bibliografía al respecto de protocolos de evaluación, que no son el motivo de esta síntesis y justificación de los aspectos tratados en los estudios experimentales de esta Tesis Doctoral, y que en parte se han citado descrito en los puntos 1.2 y 1.3.

Es también motivo de este apartado indicar varios aspectos interesantes desde un punto de vista práctico del entrenamiento, que ha demostrado la investigación.

En cuanto a la utilidad de las mediciones en tapiz, hay que hacer ciertas consideraciones desde un punto de vista práctico. Por una parte es precisa una mínima familiarización previa, que puede ser de unos minutos de ejercicio previos, el mismo día o días previos a la prueba, en corredores no acostumbrados (Meyer *et al* 2003, Billat 2002, Schieb 1986).

Esto no evita que existan algunas modificaciones técnicas (Nelson *et al* 1972) fruto de que el movimiento del tapiz disminuye el coste de la impulsión, especialmente a alta velocidad (Frishberg 1983) que hacen desaconsejable su uso a partir del 90% de la velocidad máxima de sprint (Kivi *et al* 2002).

Para compensar los efectos de la resistencia aerodinámica del exterior, habitualmente se usa el 1% de inclinación, en referencia al clásico trabajo de Pugh de 1970, aunque hay trabajos que han utilizado desde un 0,5 (Meyer *et al* 2003) a un 3% (Berthoin *et al* 1994). Lacour y Candau (1990), por su parte, han utilizado el 0% y ha comparado la VAM del tapiz con el test de Brue en pista, tras ciclista, con

protocolos semejantes, observando la necesidad de incrementar en $1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ la velocidad del tapiz para hacerla equivalente a la de la pista (Billat 2002).

Figura 1.11.1

Características y criterios de las pruebas para evaluar VO_2max , VAM, Velocidad pico o Tiempo Límite en VAM

Método general:

- Las cargas constantes (~6-10 min) permiten observar mejor la meseta y con ello un valor más real de VO_2max , pero dado que se recomiendan estadios de al menos 3-4 min, puede que la fatiga acumulada limite el valor alcanzado (Billat 2002), en un 1-4% (Jones 2006).

- Protocolos muy rápidos o en campo pueden hacer que la V_{pico} ocurra claramente después que la VAM, por lo que hay que discriminarla (Billat 2002). Así mismo esa VAM, aunque se localice con VO_2 , es menos representativa de cara al entrenamiento.

Criterios:

VO_2max :

-Meseta de VO_2 (En ocasiones no se produce. Uno de los muchos criterios publicados es el incremento inferior a $2 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ en cargas sucesivas) (Shephard 2000).

-FC máxima, preferiblemente la FC Máxima Real o en su defecto las fórmulas $207-(0,7\cdot\text{edad})$ (Gellish *et al* 2007), $208-(0,7\cdot\text{edad})$ (Tanaka *et al* 2001), o $205,8-(0,685\cdot\text{edad})$ (Inbar *et al* 1994)

- Cociente Respiratorio (RQ) $>1,05$ o $1,10$ (Billat 2002)

- Lactato $>8-9 \text{ mMol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Billat 2002)

VAM: 1ª velocidad en la que ya hay meseta de VO_2 (Billat 2002)

Vpico: velocidad del último estadio completado íntegramente (Noakes *et al* 1990).

Parece que el VO_2max , la FC max, la Ventilación máxima o el Pulso de O_2 , no cambian en ejercicio máximo entre el tapiz y la carrera en pista (Meyer *et al* 2003, Crouter *et al* 2001). Puede que existan diferencias leves en cuanto a una mayor habilidad para prolongar en el esfuerzo en la pista, por una leve mejor economía en ésta, al correr con una mecánica más natural (Meyer *et al* 2003), y también un mayor lactato pico en pista, por la libertad y seguridad para esforzarse al límite (Crouter *et al* 2001).

Del global de los estudios se desprende que la familiarización y la administración de protocolos lo más parecidos posibles permitirá que los resultados en tapiz o pista sean muy similares.

En cuanto a los valores de $VO_2\text{max}$ y $FC\text{max}$, se ha indicado que los valores en entrenados son iguales con pendiente o sin ella (Melin y Jiménez 1989), aunque se recomienda la pendiente en corredores de montaña (Billat 2002, Freud *et al* 1986)

Así mismo entre los protocolos incrementales en rampa o escalonados (Vanderwalle y Friemel 1989), aunque hay que tener ciertas consideraciones, resumidas en la figura 1.11.1

Respecto a la determinación de umbrales, es muy interesante saber que aunque los deportistas mejoren su rendimiento, durante cierto tiempo (al menos una temporada), si tienen continuidad, la FC de dichos umbrales no se modifica (Lucía *et al* 2000).

Y aunque para su localización existe una gran cantidad de métodos, adaptaciones y comparaciones, que han llevado a numerosas revisiones, parece que la localización de dichas intensidades, desde un punto de vista práctico, puede ser común en varias metodologías (Seiler y Kjerland 2006). Como ejemplo, de los trabajos de Lucía y colaboradores (1999) se desprende que los umbrales ventilatorios (VT y RCT) se corresponden con los dos umbrales por metodología de lactato en prueba incremental, siendo esto además corroborado por la EMG (Lucía *et al* 1999, Chwalbinska-Moneta *et al* 1998).

En los apartados 1.2 y 1.9 ya se expusieron los motivos por lo que quizá el mejor método sea el MLSS con la metodología de Beneke (2003). Sin embargo, en la figura 1.11.2 adjuntamos otras metodologías sencillas en función de los medios disponibles e intereses del investigador o entrenador.

De todo ello se desprende, como aplicación práctica, que lo mejor es decidirse por una metodología contrastada al alcance de los propios medios disponibles, y aplicarla de forma consistente para poder comparar a lo largo de las temporadas.

En cuanto a la economía (figura 1.11.3), parece que, nuevamente con fines prácticos más que de investigación, es preferible medirla a velocidades próximas a la de competición (Jones 2006, Daniels y Daniels 1992).

Figura 1.11.2 Características y criterios de las pruebas para evaluar 2 umbrales de esfuerzo

Método general:

- **Ergoespirometría:** Determinar VT y RCT para aprovechar a evaluar $VO_2\text{max}$, VAM y V_{pico} , en prueba incremental hasta la extenuación de estadios cortos e incrementos cortos ($0,3$ o $0,5\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ cada 30s, o $1\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ cada 1min (Esteve-Lanao *et al* 2005, Esteve *et al* 2004) de 7-10 min totales (Jones 2006).

- **Lactato:** Determinar LT y LTP (Kindermann *et al* 1979, Smith y Jones 2001) en test incremental y MLSS con cargas constantes de al menos 30 min (Beneke 2003).

- **Deflexión de FC:** Incremento entre $0,3$ km/h cada 30 s (protocolo de Brue adaptado por Gacon 1990), o $0,5\text{km}/\text{h}$ cada 200m (Conconi *et al* 1982), o disminuir 2s cada 200m (Petit *et al* 1997). Como alternativa, estimar dos % Standard en FC y asociarlos a velocidad

- **Índice de Resistencia:** A partir de una marca en competición y el $VO_2\text{max}$

Criterios:

VT: Incremento del $VE\cdot VO_2^{-1}$ y la $PETO_2$ sin incremento del $VE\cdot VCO_2^{-1}$ (Lucía *et al* 2000).

RCT: Incremento del $VE\cdot VO_2^{-1}$ y $VE\cdot VCO_2^{-1}$ y descenso de la $PETCO_2$ (Lucía *et al* 2000).

LT (Lactic Threshold, Kindermann 1979): 1er incremento del lactato desde el reposo.

LTP (Lactate Turn Point, Smith y Jones 2001): 2º incremento brusco y mantenido del lactato

MLSS (Maximal Lactate Steady State): Incremento de LA desde los 10 min hasta el final $\leq 1\text{mMol}/\text{L}$ (Beneke 2003).

Deflexión de FC: Una vez localizada restar un 7-13% en FC y velocidad (Jones y Doust 1997, Zacharogiannis y Farrally 1993).

Como alternativa a los umbrales: usar 70 y 90% de $FC\text{max}$ y localizar su velocidad en la prueba (Esteve-Lanao *et al* 2005). En muy entrenados 81-91% (Seiler y Kjerland 2006), y en poco entrenados 55-85% (ACSM 1998)

Índice de Resistencia (IR): Calcular % de la VAM que supuso la velocidad media de la competición ("A"). Indicar la duración de la competición en segundos ("B"). Calcular: $IR = 100 - A / (\ln 360s - \ln B)$ (Cálculos simplificados por Billat 2002. Para mayor detalle consultar Péronnet *et al* (2001)).

Así, en corredores de pruebas cortas es preferible medirla a alta intensidad, y en fondistas evaluar el efecto de la fatiga, tanto con el componente lento en tandas sin fatiga, como en mediciones en situación de fatiga.

En general, es interesante medirla a diversas velocidades, y utilizar la expresión $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ para poder comparar entre ellas y con otros atletas.

Figura 1.11.3

Características y criterios de las pruebas para evaluar la economía de carrera

Método general:

- Cargas constantes a velocidad $\leq 95\%$ de la VAM pero lo más cercanas a la competición (Jones 2006, Daniels y Daniels 1992)
- Duración mínima de 4 min, pues los valores se estabilizan a los 3 min (Gaesser y Poole 1996).
- Evaluar el componente lento entre el valor medio en del minuto 3 al 4 y el final de la prueba (Gaesser y Poole 1996).
- En corredores de pruebas largas, evaluarla también en fatiga, tras esfuerzos largos e intensos

La evaluación de la capacidad anaeróbica es tremendamente compleja y parece que en sentido estricto imposible, actualmente, debido al solapamiento metabólico y que los métodos y resultados de los estudios no son consistentes (Green y Dawson 1993). La figura 1.11.4 indica métodos y criterios.

Figura 1.11.4

Características y criterios de las pruebas para evaluar la Capacidad Anaeróbica

Método general:

- Test MART (Nummela *et al* 2006): Sprints de $10\times 150\text{m}$ con 100s de pausa siendo la primera repetición a $4,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e incrementando hasta la 9ª $0,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La última al máximo (M10).
- Test MAOD (Medbø *et al* 1988). 2 min a una velocidad entre el 110 y el 120% de la VAM
- Estimación por medio de una marca de 5000 o inferior, usando las tablas de Péronnet *et al* (2001)

Criterios:

MART= Se calcula la demanda de VO_2 del sprint nº10 (M10) en $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ del siguiente modo:
Demanda de VO_2 en MART = $0,205 \cdot v\text{M10} (\text{m}\cdot\text{min}^{-1}) + 0,109 \cdot (v\text{M10} (\text{m}\cdot\text{min}^{-1})/60)^2 - 6,1$.
Entonces se calcula la habilidad del corredor para producir potencia por encima de $\text{VO}_2 \text{ max}$ tal que:
Ganancia de VO_2 en MART ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) = Demanda de VO_2 en MART ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) - $\text{VO}_2 \text{ max}$ ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$).

MAOD= Se extrapola el VO_2 necesario para el %VAM elegido, y luego se va midiendo el VO_2 real cada cierto lapso de tiempo, por ejemplo, cada 10 o 15 s. Se restan las necesidades del VO_2 , en cifras totales durante el tiempo total. A mayor diferencia mayor DMAO. La figura 1.2.3 del apartado 1.2 muestra paso a paso estos cálculos.

El método MART citado (Nummela *et al* 2006) representa una modificación del original de Rusko y colaboradores de 1993 para adaptarlo a la pista en vez del tapiz, por lo que creemos más útil. La alternativa son las repeticiones de 20 s. La medición del lactato pico post ejercicio podría ser otra medida complementaria. El problema de estas mediciones, sin embargo, es que solo son diagnósticas, y no sirven para identificar zonas de entrenamiento. Lo mismo ocurre con el Índice de Resistencia. Para clasificar el trabajo glucolítico anaeróbico recomendamos las referencias de la figura 1.11.5, anteriormente referenciadas en el apartado 1.7.

Zonas de entrenamiento

Es muy habitual y necesario establecer zonas de entrenamiento, preferiblemente basadas en referentes fisiológicos, no solo en velocidad, como ya se ha comentado y justificado en diversos apartados (1.2, 1.3, 1.7). Más importante aún es controlar la distribución del entrenamiento realizado en ellas. En este sentido ya se ha comentado la posibilidad de utilizar, de forma simple, las zonas delimitadas por los dos umbrales ventilatorios, que se conoce clásicamente como el "modelo trifásico de Skinner y McLellan" (1980).

Al margen del método empleado para su determinación, se suelen relacionar dichas intensidades con la FC, para controlar la carga interna de los esfuerzos, gracias a la ventaja que los monitores telemétricos de ritmo cardiaco ofrecen para el registro, almacenamiento y análisis de datos. Banister y colaboradores (1991) desarrollaron originalmente el método de puntuaciones de "Impulsos de Entrenamiento" (simplificado como "TRIMP" a partir de los vocablos ingleses *Training Impulse*), para cuantificar con una sola variable el producto de volumen x intensidad.

Sus cálculos eran algo complejos, y en los últimos años se empieza a popularizar otra forma mucho más sencilla, propuesta por el grupo de Foster y colaboradores (2001). Según este método un TRIMP es igual a puntuar con 1 punto cada minuto en fase I, 2 puntos cada minuto en fase II, y 3 puntos por minuto en fase III, a partir del registro

real del tiempo empleado en cada zona. Ya se han comentado los resultados obtenidos en cuanto a distribución del esfuerzo con este método en los trabajos con ciclistas de grupo de Lucía y colaboradores (2003, 2000, 1999) y por Seiler y Kjerland (2006) con esquiadores de fondo.

Con la metodología propuesta por Foster, se han valorado de forma directa que un Tour de Francia fueron unos 7100 TRIMPS, y una Vuelta a España equivaldría a unos 6700 (Lucía *et al* 2003). Nuestros cálculos en corredores nos indican que la carga realizada por éstos en 19 semanas de entrenamiento equivale a 6900 TRIMPS, es decir, la carga que soportan los ciclistas en 3 semanas de competición, por lo que la proporción es de más de 6 a 1 (Esteve-Lanao *et al* 2005).

Estas enormes diferencias no se justifican únicamente porque los ciclistas fueran profesionales de élite y nuestros corredores únicamente de alto nivel regional. Parece que las diferencias tanto en el tipo de competición como en las duraciones de los entrenamientos extensivos de ambos deportes, como las diferencias de daño muscular por el componente excéntrico de la carrera, hacen que no sean comparables las cifras de ambos deportes en puntuaciones TRIMP, pero este método puede ser muy interesante de todos modos en cada deporte.

La carencia de este modelo simplificado de cuantificación, es que se obtendrá la misma puntuación con 1 minuto a 2 pulsaciones por encima de umbral anaeróbico que con 1 minuto a VO₂max. Así mismo las zonas 2 y 3 pueden muy "amplias" en relación a la fatiga. El modelo original de Bannister compensaba este hecho con el valor puntual de la FC registrada y la aplicación de constantes. Pero otro problema es en sí la FC, no solo en esfuerzos aeróbicos sino lógicamente más en los esfuerzos anaeróbicos. En entrenamientos por intervalos a intensidades inferiores a la VAM, la cuantificación del tiempo en zona 3 respecto a la velocidad se subestima en esfuerzo y se sobreestima en la pausa (FC baja al inicio de la repetición y en zonas 3 y 2 en la pausa, incluso si es pasiva).

Cálculos realizados en todo un macrociclo nos han mostrado que el tiempo registrado

por FC en zona 3 era inferior en un 32% ± 12 (rango 18 a 51%) al tiempo real en velocidad de zona 3 analizando los datos por mesociclos de 3 semanas durante los 8 mesociclos de todo un macrociclo de campo a través, con un régimen de entrenamiento 99% igual o inferior a la VAM, registrando todas las sesiones (Esteve-Lanao temporada 03-04, sin publicar).

En entrenamientos a velocidades superiores a la VAM, lógicamente la utilidad de la FC se pierde y por ello si el corredor entrena a menudo dichas intensidades este modelo de control no resulta nada útil, y hay que buscar alternativas a la ponderación de la intensidad del esfuerzo.

Muchos entrenadores utilizan más de tres zonas de entrenamiento, habitualmente de cinco a siete (Noakes 2003, Billat 2002, Péronnet *et al* 2001). La figura 1.11.5 muestra, como ejemplo, las utilizadas por Gaskill y colaboradores (1999) en un estudio de varias temporadas con esquiadores de fondo.

Figura 1.11.5
Zonas de entrenamiento
en el trabajo de Gaskill 1999

Zona	Descripción	Rango de FC
1	Muy Fácil	LT-60 a -35
2	Fácil	LT-35 a -20
3	Moderado	LT-20 a -5
4	Duro	LT-5 a +10
5	Muy Duro	LT+10 a FCmax

LT= FC correspondiente al umbral anaeróbico

Valores de referencia de la evolución del rendimiento fisiológico

Otro aspecto de gran interés es conocer niveles de rendimiento de referencia en las variables determinantes del rendimiento. En este sentido, tanto las referencias de Billat (2002) como las tablas de Péronnet y colaboradores (2001) relacionando estas variables con las marcas en las distintas distancias son de gran interés, tanto para evaluar las posibilidades del corredor/a como para determinar si su perfil fisiológico está compensado, de cara a saber puntos más fuertes o débiles en relación a las marcas logradas.

La figura 1.11.6 muestra una modificación de las referencias de Billat, añadiendo referencias de Péronnet y colaboradores (2001), y referencias de las evaluaciones de Lucía y colaboradores (2006).

Figura 1.11.6
Baremo de referencia del perfil fisiológico para corredores de cualquier nivel (a partir de Billat 2002, Péronnet *et al* 2001 y Lucía *et al* 2006)

CLASIFICACIÓN	VALORACIÓN	ÍNDICE DE RESISTENCIA (nivel mínimo)	UMBRAL ANAERÓBICO (% VO ₂ max) (nivel mínimo)	VO ₂ MAX (ml/kg/min)		TLÍM VAM (min)	DMQA (ml / kg)
				HOMBRES	MUJERES		
EXCELENTE	10	-3	95	85	75	9	75
	9	-3,5	93	80	70	8	70
MUY BUENO	8	-4	90	75	65	7	65
	7	-4,5	85	70	60	6	60
BUENO	6	-5	83	65	55	5	55
	5	-6	80	60	50	4	50
MEDIO	4	-7	78	55	45	3,5	45
	3	-8	75	50	40	3	40
BAJO	2	-9	70	45	35	2,5	35
	1	-11	65	40	30	2	30
MUY BAJO	0	-13	60	35	25	1,5	25

CLASIFICACIÓN	VALORACIÓN	CAPACIDAD ANAERÓBICA (cal/kg)	VO ₂ MAX (km/h)		Umbral Anaeróbico (km/h)		ECONOMÍA (ml/kg/km)
			HOMBRES	MUJERES	HOMBRES	MUJERES	
EXCELENTE	10	390	24	21,8	21,6	19,6	177
	9	374	22,2	20	20,0	18,0	184
MUY BUENO	8	358	21,8	19	19,6	17,1	191
	7	342	20	17,5	18,0	15,8	198
BUENO	6	326	19	16,5	17,1	14,9	205
	5	310	17,5	14,8	15,8	13,3	213
MEDIO	4	293	16	13,2	14,4	11,9	220
	3	276	14,6	11,7	13,1	10,6	227
BAJO	2	259	13,2	10,2	11,9	9,2	235
	1	242	11,7	8,7	10,5	7,8	242
MUY BAJO	0	225	10,2	7,1	9,2	6,4	249

En cuanto a los datos masculinos, podemos constatar, por mediciones realizadas en nuestro laboratorio a diversos corredores marroquíes de elite, y los corredores de las selecciones eritrea y española, entre ellos el campeón del mundo campo a través, que el baremo en su parte superior se corresponde con los datos hallados.

Respecto a los datos femeninos, sin embargo, parece que los criterios principales de Billat (2002) respecto a las diferencias con los hombres no se corroboran en la realidad de los datos obtenidos con la *recordwoman* actual de maratón (Jones 2006), que igualan en diversos aspectos a los de los hombres en dicho baremo.

Esto demuestra que son necesarios más estudios y publicaciones con datos sobre los mejores corredores en sus mejores momentos de forma, salvo estas excepciones y pocas más, como los datos

de Saltin con los campeones kenianos (1995) o Billat con otros kenianos destacados (Billat 2003).

La figura 1.11.7 muestra una comparativa entre la *recordwoman* de maratón (Paula Radcliffe), y el campeón mundial de cross de 2007 (Zerisenay Tadesse), de la que podrían hacerse numerosas lecturas, pero que se muestra simplemente a modo de referencia.

Figura 1.11.7
Comparativa del perfil fisiológico la *recordwoman* mundial de maratón (PR) y el campeón mundial de cross de 2007 (TZ) (a partir de los datos de Jones 2006 y datos del trabajo de Lucía *et al* 2006)

	PR	TZ
Peso (kg)	54	56,2
Talla (m)	1,73	1,63
IMC (kg/m²)	18,0	21,1
VO₂ max (mL·kg⁻¹·min⁻¹)	70 (*)	83,7
Economía (**) (mL·kg⁻¹·km⁻¹)	165	171
VAM (km·h⁻¹)	23,5	24
Índice de Resistencia (†)	-3	-5
vUAN (km·h⁻¹)	20	20
Fcmax (ppm)	197	190
FC UAN (ppm)	185	174

(*) Se indica que habitualmente ha sido 70, pero que llegó a registrarse 80 alguna vez.

(**) En ella se midió a 16 km·h⁻¹, en él a 17

(†) Se estima entorno a esos valores y 0,5 peores, pues la marca personal no se hizo en fecha muy próxima a la mejor evaluación del VO₂ max en ambos casos

Existen más limitaciones importantes en la documentación sobre niveles de referencia.

Por una parte, faltan por añadir datos sobre variables como la fuerza, la capacidad de salto, la velocidad o la flexibilidad, pese a que existen trabajos que han evaluado variables de ese tipo (Nummela *et al* 2006, Harrison *et al* 2004, Lattier *et al* 2003, Jones 2002, Paavolainen *et al* 1999a, Paavolainen *et al* 1999b, Craib *et al* 1996, Gleim *et al* 1990, etc).

Aparte de que nos existen tantos datos en distintos niveles de rendimiento como para confeccionar un baremo fiable, la cuestión más importante es que añadirlos podría generar confusión por cuanto falta por determinar su relación causal con el rendimiento o los factores que lo determinan.

Se requiere por tanto de investigaciones sobre estas variables, que forman parte de los contenidos de entrenamiento, pero que no se sabe hasta qué nivel es preciso desarrollar en diversos momentos de la temporada, y qué influencia tiene ello en el rendimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ESTE APARTADO:

- American College of Sports Medicine. Position Stand: The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:975-991.
- Banister EW. Modeling elite athletic performance. En: Physiological Testing of Elite Athletes, H. J. Green, J. D. McDougal, Wenger H (eds) Human Kinetics, Champaign, IL, pp. 403-424, 1991.
- Beneke R. Methodological aspects of maximal lactate steady state-implications for performance testing. *Eur J Appl Physiol* 2003;89:95-99.
- Berthoin S, Gerbeaux M, Turpin E, Guerrin F, Lensele-Corbeil G, Vandendorpe F. Comparison of two field tests to estimate maximum aerobic speed. *J Sports Sci* 1994;12:355-362.
- Billat V. Fisiología y Metodología del Entrenamiento. Paidotribo, Barcelona 2002.
- Chwalbinska-Moneta J, Kaciuba-Uscilko H, Krzyztofiak H, Ziemia A, Krzeminski K, Kruk B, Nazar K. Relationship between EMG, blood lactate, and plasma catecholamine thresholds during graded exercise in men. *J Physiol Pharmacol* 1998;49:433-441.
- Conconi F, Ferrari M, Ziglio PG, Droghetti P, Codeca L. Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners. *J Appl Physiol* 1982;52:869-873.
- Craib MW, Mitchell VA, Fields KB, Cooper TR, Hopewell R, Morgan DW. The association between flexibility and running economy in sub-elite male distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 1996;28:737-743.
- Crouter S, Foster C, Esten P, Brice G, Porcari J. Comparison of incremental treadmill exercise and free range running. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:644-647.
- Daniels J, Daniels N. Running economy of elite male and elite female runners. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:483-489.
- Esteve-Lanao J, San Juan AF, Earnest CP, Foster C, Lucía A. How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Med Sci Sports Exerc* 2005;37:496-504.
- Esteve J, San Juan AF, López-Mojares LM. "¿La infusión de suero mejora la economía de carrera?" *Arch Med Deporte* 2004;21:297-308.
- Frishberg B. An análisis of overground and treadmill sprinting. *Med Sci Sports Exerc* 1983;15:478-485.
- Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, Parker S, Doleshal P, Dodge C. A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res* 2001;15:109-115.
- Freund BJ, Allen D, Wilmore JH. Interaction of test protocol and inclined run on maximal oxygen uptake. *Med Sci Sports Exerc* 1986;18:588-592.
- Gacon G. Hacia una nueva definición del trabajo máximo aeróbico del mediofondista. Cuadernos de Atletismo pp67-94, RFEA-ENE, Madrid, 1990.
- Gaesser GA, Poole DC. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. En: Holloszy JO (ed). Exercise and Sport Science Reviews, vol 24. Williams & Willkins, Baltimore, pp 35-70, 1996.

- Gellish R, Goslin BR, Olson RE, Mc Donald A, Russi GD, Moudgil VK. Longitudinal modeling of the relationship between age and maximal heart rate. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39:822-829.
- Gleim GW, Stachenfeld NS, Nicholas JA. The influence of flexibility on the economy of walking and jogging. *J Orthop Res* 1990;8:814-823.
- Green S, Dawson B. Measurement of anaerobic capacities in humans. *Sports Med* 1993;15:312-327.
- Harrison AJ, Keane SP, Coglán J. Force-velocity relationship and stretch-shortening cycle function in sprint and endurance athletes. *J Strength and Cond Res* 2004;18:473-479.
- Inbar O, Oten A, Scheinowitz M, Rotstein A, Dlin R, Casaburi R. Normal cardiorespiratory responses during incremental exercise in 20-70-yr-old men. *Med Sci Sports Exerc* 1994;26:538-546.
- Jones AM. The physiology of the World Record Holder for the Women's Marathon. *Int J Sports Sci and Coaching* 2006;1:101-116.
- Jones AM. Running economy is negatively related to sit-and-reach test performance in international-standard distance runners. *International Journal of Sports Medicine* 2002;23:40-43.
- Jones AM, Doust JH. The Conconi test is not valid for estimation of the lactate turnpoint in runners. *J Sports Sci* 1997;15:385-394.
- Kindermann W, Simon G, Keul J. The significance of the aerobic-anaerobic determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol* 1979;42:25-34.
- Kivi DMR, Maraj BKV, Gervais P. A kinematic analysis of high-speed treadmill sprinting over a range of velocities. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:662-666.
- Lacour JR, Candau R. Vitesse maximale aérobie et performance en course à pied. *Science et Sport* 1990;5:183-189.
- Lattier G, Guillaume Y, Millet, Nicola A, Maffioletti, Nicolas Babault, and Romuald Lepers. Neuromuscular Differences Between Endurance-Trained, Power-Trained, and Sedentary Subjects. *J Strength Cond Res* 2003;17:514-521.
- Lucia A, Esteve-Lanao J, Oliván J, Gomez-Gallego F, San Juan AF, Santiago C, Perez M, Chamorro-Vina C, Foster C. Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Appl Physiol Nutr Metab* 2006;31:530-540.
- Lucía A, Hoyos J, Santalla A, Earnest C, Chicharro JL. Tour de France vs Vuelta a España: Which is harder? *Med Sci Sports Exerc* 2003;35:872-878.
- Lucia A, Hoyos J, Pérez M, Chicharro. Heart rate and performance parameters in elite cyclists: A longitudinal study. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:1777-1782.
- Lucía A, Sánchez O, Carvajal A, Chicharro JL. Analysis of the aerobic anaerobic transition in elite cyclists during incremental exercise with the use of electromyography. *Br J Sports Med* 1999;33:178-185.
- Medbø JL, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted OM. Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol* 1988;64:50-60.
- Melin B, Jiménez C. L'effet de la pente sur la relation fréquence cardiaque, la consommation d'oxygène au tours d'un exercice progressif et maximal sur tapis roulant. *Sport Médecine actualité* 1989;39:5-8.
- Meyer T, Welter JP, Scharhag J, Kindermann W. Maximal oxygen uptake during field running does not exceed that measured during treadmill exercise. *Eur J Appl Physiol* 2003;88:387-389.
- Nelson RC, Dillman ChL, Lagasse P, Bickett Ph. Biomechanics of overground versus treadmill running. *Med Sci Sports* 1972;4:233-240.
- Noakes TD, Myburgh KH, Schall R. Peak treadmill running velocity during the VO₂ max test predicts running performance. *J Sports Sci* 1990;8:35-45.

Nummela AT, Paavolainen LM, Sharwood KA, Lambert MI, Noakes TD, Rusko HK. Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. *Eur J Appl Physiol* 2006;97:1-8.

Paavolainen L, Häkkinen K, Härmäläinen I, Nummela A, Rusko H. Explosive-strength training improves 5-Km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol* 1999a;86:1527-1533. Paavolainen L, Nummela A, Rusko H, Häkkinen K. Neuromuscular characteristics and fatigue during 10km running. *Int J Sports Med* 1999b;20:516-521.

Petit MA, Nelson CM, Rhodes EC. Comparison of a mathematical model to predict 10-km performance from the Conconi test and ventilatory threshold measurements. *Can J Appl Physiol* 1997;22:562-572.

Pugh LG. Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance. *J Physiol* 1970;207:823-835.

Rusko H, Nummela A, Mero A. A new method for the evaluation of anaerobic running power in athletes. *Eur J Appl Physiol* 1993;66:97-101.

Seiler KS, Kjerland GØ. Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an "optimal" distribution?. *Scand J Med Sci Sports* 2006;16:49-56.

Shephard R. Consumo máximo de oxígeno, pp 204. EN: Shephard RJ, Astrand PO. La resistencia en el deporte, Paidotribo, Barcelona 2000.

Schieb DA. Kinematic accommodation of novice treadmill runners. *Res Q Exerc Sports* 1986;57:1-7.

Skinner JS, McLellan TH. The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Res Q Exerc Sport* 1980;51:234-248.

Smith GC, Jones AM. The Relationship Between Critical Velocity, Maximal Lactate Steady-State Velocity and Lactate Turnpoint Velocity in Runners. *European Journal of Applied Physiology* 2001;85:19-26.

Tanaka H, Monahan KD, Seals DR. Age-predicted maximal heart-rate revisited. *J Am Coll Cardiol* 2001;37:153-156.

Vanderwalle H, Friemel F. Test d'évaluation de la puissance maximale des métabolismes aérobie et anaérobie. *Science et Sport* 1989;4:265-279.

Zacharogiannis E, Farrally M. Ventilatory threshold, heart rate deflection point and middle distance running performance. *J Sports Med Phys Fitness* 1993;33:337-347.

2.- OBJETIVOS y DISEÑO GENERAL DE LA TESIS DOCTORAL

El objeto principal de esta Tesis Doctoral es responder, al menos de forma parcial, a las siguientes preguntas, planteadas desde la óptica de la carga interna del esfuerzo (es decir, de la respuesta fisiológica al mismo):

- 1- *¿Cómo entrenan los atletas de fondo?*
- 2- *¿Cómo compiten?*
- 3- *¿Qué relación hay entre cómo entrenan y cómo compiten?*

Hemos tratado de responder a cada una de estas complejas preguntas, al menos parcialmente, en trabajos que se desarrollarían durante cuatro temporadas consecutivas en un grupo de corredores de buen nivel que eran entrenados personalmente por el investigador.

La primera pregunta se formula en el título abreviado del Estudio 1 (*How do Runners Train?*). Por tanto se trata de un trabajo descriptivo, concretamente sobre la distribución natural del esfuerzo según el clásico modelo trifásico de Skinner y McLellan (1980) a lo largo del entrenamiento y competiciones de todo un macrociclo de 24 semanas de la temporada de campo a través 03-04.

Ese modelo fue propuesto por Foster y colaboradores en 2001. Debido a su experiencia en este campo, este autor fue requerido para la redacción final del manuscrito, firmado a su vez por otros colaboradores puntuales en el proceso de experimental o de redacción.

Los sorprendentes resultados hallados al relacionar dichos datos con el rendimiento en competición, junto con las publicaciones recientes en ese momento al respecto de ese tema en el panorama internacional, precipitaron la realización del Estudio 2, que aunque ya había sido diseñado en el proyecto original de Tesis, aborda la pregunta 3 anteriormente citada (*¿Qué relación hay entre cómo entrenan y cómo compiten?*).

En este trabajo se dividió a un grupo de 20 corredores de campo a través de alto nivel en dos grupos experimentales, que entrenaron nuevamente durante todo un macrociclo de invierno de 24 semanas para

competir en campo a través, con 2 tratamientos experimentales.

Contabilizando una misma carga real semanal y total con el sistema de puntuación "TRIMP" modificado por Foster y colaboradores en 2001 un grupo realizaría una distribución del esfuerzo fomentando el entrenamiento en zona II del modelo trifásico frente a otro grupo que lo haría en zona I.

Debido a su protagonismo en diversas publicaciones y manuscritos relacionados con el tema, se requirió la participación en la redacción final del manuscrito del profesor Stephen Seiler, así como nuevamente de Carl Foster. Con ambos autores se tuvo un encuentro personal en 2006 previo a la redacción final del trabajo.

La pregunta nº 2 originaria iba a ser tratada evaluando la cinética de la FC en competición en distancias de 5 y 10 kilómetros, ½ Maratón y Maratón. Para ello se recopilaron registros de la FC en 211 corredores que completaron 456 participaciones en competición con el criterio de esfuerzo máximo realizado tras una preparación específica y dando lugar a una marca personal o un registro cercano a ella. Se pretendía con ello poder describir la cinética óptima de la FC en relación a la FC máxima de un corredor y su marca potencial, así como la distribución del esfuerzo según el modelo trifásico, en cada prueba.

La lentitud para lograr recopilar al menos 2 datos por corredor y prueba y 50 corredores por categoría, unido a la dificultad para contactar con un experto en el análisis de la función matemática de la cinética de la FC, y la voluntad por presentar en 2007 esta Tesis Doctoral, obligaron a sustituir dicho estudio por el estudio 4. Por ello se observará en la figura 2.1 que en la temporada 05-06 no se realizó ningún trabajo incluido en esta Tesis.

El Estudio 3 aborda de nuevo las preguntas 1 y 3 como complemento al estudio 2 sobre periodización experimental del entrenamiento de resistencia. En este Estudio 3 se comparan 2 programas de entrenamiento de fuerza experimentales (periodizado y no periodizado), dentro de una preparación de corredores de fondo de alto nivel en su macrociclo de pista al aire

libre. Un tercer grupo control no realizó el entrenamiento de fuerza, y todos los grupos compartieron el mismo entrenamiento de resistencia.

Figura 2.1
Representación del Diseño General de los
4 Estudios de la Tesis Doctoral

Estudio 1 (temporada de invierno 03-04)	
Tipo de Estudio	Descriptivo
Objetivos	Cuantificar la carga fisiológica del entrenamiento con el modelo trifásico de zonas de FC Relacionar la distribución natural con el rendimiento en competición de campo a través corta y larga
Método	8 sujetos registrando tiempo en cada zona del modelo trifásico durante 24 semanas
Estudio 2 (temporada de invierno 04-05)	
Tipo de Estudio	Experimental (intervención)
Objetivos	Comparar el efecto de cada programa de entrenamiento con el rendimiento en competición de campo a través larga
Método	2 grupos de 6 sujetos, con una distribución cada zona durante 21 semanas con énfasis en zona I o II, con igual carga total semanal y nivel inicial
Estudio 3 (temporada de aire libre 04-05)	
Tipo de Estudio	Experimental (intervención)
Objetivos	Comparar el efecto del entrenamiento de fuerza periodizado sobre la capacidad para mantener la zancada en fatiga a velocidades de competición, respecto al entrenamiento no periodizado o la ausencia de entrenamiento de fuerza
Método	18 sujetos a los que se les registra todos los entrenamientos en el período específico de la temporada de pista al aire libre, evaluando un índice de estabilidad de la zancada en relación a la velocidad
Estudio 4 (temporada de invierno 06-07)	
Tipo de Estudio	Descriptivo
Objetivos	Seleccionar las variables que determinan el rendimiento en campo a través en el momento de mayor rendimiento
Método	5 sujetos evaluados en 3 momentos de la preparación en numerosas variables de fuerza, velocidad y resistencia durante 24 semanas del macrociclo de campo a través, junto al rendimiento

Por último, el Estudio 4 aborda la pregunta 3 (*¿Qué relación hay entre cómo entrenan y cómo compiten?*), desde otra óptica. Nuevamente con un diseño de macrociclo de una temporada de campo a través en corredores de alto nivel, el objetivo fue evaluar numerosas variables que pudieran tener alguna relación con el rendimiento a lo largo de la temporada. Concretamente se evaluó dicho rendimiento en competición en 3 momentos equidistantes a principio, mediados y final de macrociclo.

La figura 2.1 muestra esquemáticamente el diseño de los 4 estudios.

Una vez revisados los trabajos previos relacionados con los temas a tratar en la presente Tesis Doctoral, así como el diseño general de los 4 estudios que la componen, los objetivos concretos de la misma fueron:

1- Comparar el efecto de modificar la distribución natural de la carga de entrenamiento en relación al modelo trifásico sobre el rendimiento en competición

2- Comparar el efecto de la periodización del entrenamiento de fuerza sobre la habilidad para mantener la estabilidad de la zancada a velocidad de competición en fatiga.

3- Discriminar las variables más relacionadas con el rendimiento en competición en el período competitivo en campo a través en distintos momentos de la temporada.

En las referencias bibliográficas de este apartado se muestran otros trabajos publicados en los que el autor de esta Tesis Doctoral ha participado en los últimos años, con motivo de situar el contexto investigador de los presentes estudios.

La motivación principal del autor para realizar esta Tesis Doctoral fue la de profundizar en sus conocimientos como entrenador, desde una perspectiva científica y práctica, con el deseo de aportar rigor y nuevos conocimientos aplicados al campo de la periodización y control del entrenamiento en deportes de resistencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ESTE APARTADO:

Esteve-Lanao J, Naclerio F, España J, Rhea M, Lucía A. Testing Variables related to Performance during a Whole Season in Cross Country Runners. *J Strength Cond Res* (en revisión).

Esteve-Lanao J, Rhea M, Fleck S, Lucía A. Periodized Strength Training Attenuates Loss of Stride Length in Endurance Runners. *J Strength Cond Res* 2007 (en prensa).

Esteve-Lanao J, Seiler S, Foster C, Lucía A. Impact of training distribution on endurance performance. *J Strength Cond Res* 2007; 21,943–949.

Esteve-Lanao J. El entrenamiento de la fuerza en deportes de resistencia: Una propuesta de Entrenamiento y Control de la Fuerza Específica en Corredores de Fondo EN: Jiménez A. Entrenamiento de Fuerza: Avances y nuevas tendencias .INDE, Barcelona 2007 (en proceso de maquetación).

Esteve-Lanao J. El entrenamiento de la fuerza y resistencia en corredores: Últimas tendencias y aplicaciones. EN: Jiménez A. Avances en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte: Entrenamiento de Fuerza. Escuela de Estudios Universitarios Real Madrid Universidad Europea, Madrid 2007.

Esteve-Lanao J, San Juan AF, Earnest CP, Foster C, Lucía A. How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Med Sci Sports Exerc* 2005;37:496-504.

Esteve J. Prescripción de ejercicio aeróbico EN: Jiménez A. Entrenamiento Personal: Bases, fundamentos y aplicaciones. INDE, Barcelona 2005.

Esteve-Lanao J, San Juan AF, López-Mojares. ¿La infusión de suero mejora la economía de carrera? *Arch Med Deporte* 2004;21:297-308.

Esteve-Lanao J. Control del entrenamiento y competición en corredores de campo a través. *Kronos* 2004;5,11-18.

Esteve-Lanao J. El entrenamiento combinado de fuerza y resistencia, interacción o interferencia. EN: Jiménez A. Fuerza y salud, la aptitud músculo-esquelética, el entrenamiento de fuerza y la salud. Ergo, Barcelona 2003.

Esteve-Lanao J. Genes relacionados con el rendimiento de resistencia. *Kronos* 2003;2:1-8.

Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, Parker S, Doleshal P, Dodge C. A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res* 15: 109–115, 2001.

Lucía A, Esteve-Lanao J, Oliván J, Gomez-Gallego F, San Juan AF, Santiago C, Perez M, Chamorro-Vina C, Foster C. Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Appl Physiol Nutr Metab* 2006;31:530-540.

Ramirez M, Lucía A, Gómez-Gallego F, Esteve-Lanao J, Pérez-Martínez A, Foster C, Andreu AL, Martín MA, Madero L, Arenas J, García-Castro J. Mobilisation of mesenchymal cells into blood in response to skeletal muscle injury. *Br J Sports Med* 2006;40:719-722.

Lucía A, Martín MA, Esteve-Lanao J, San Juan AF, Rubio AJ, Oliván J, Arenas J. C34T mutation of the AMPD1 gene in an elite white runner. *Br J Sports Med* 2006;40:e7.

Boraita A, Esteve-Lanao J, Pérez M, Rabadán M, Foster C, Lucía A. Ventricular septal defect in a world class runner. *Br J Sports Med* 2005;39: e32.

Skinner JS, McLellan TH. The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Res Quart Exerc Sport* 1980;51:234-248.

3.- ESTUDIOS

A continuación se desarrollan los 4 trabajos.

El estudio 1 ha sido publicado en la revista *Medicine and Science in Sports and Exercise*, publicación científica oficial del ACSM (*American College of Sports Medicine*) (Esteve-Lanao et al 2005).

El estudio 2 ha sido publicado en la revista *Journal of Strength and Conditioning Research*, publicación científica oficial de la NSCA (*National Strength and Conditioning Association*) (Esteve-Lanao et al 2007).

Por ello se muestra el *reprint* de dichos artículos originales.

El estudio 3 ha sido aceptado para su publicación en la revista *Journal of Strength and Conditioning Research*, publicación científica oficial de la NSCA (*National Strength and Conditioning Association*). (Esteve-Lanao et al 2008, en prensa). Por ello se adjunto copia de la carta de aceptación de su publicación, y se muestra una reproducción del manuscrito final, pues no se dispone aún de las galeras.

El estudio 4 ha sido enviado en su primer manuscrito oficial a la revista *Journal of Strength and Conditioning Research*, y se muestra una reproducción del mismo.

Estudio 1:

¿Cómo se entrenan los corredores? Relación con el rendimiento en competición

(How do runners train? Relationship with competition performance)

How Do Endurance Runners Actually Train? Relationship with Competition Performance

JONATHAN ESTEVE-LANA¹, ALEJANDRO F. SAN JUAN¹, CONRAD P. EARNEST², CARL FOSTER³, and ALEJANDRO LUCIA¹

¹Exercise Physiology Laboratory, European University of Madrid, SPAIN; ²Cooper Institute Center for Human Performance and Nutrition Research, Dallas, TX; and ³University of Wisconsin-La Crosse, La Crosse, WI

ABSTRACT

ESTEVE-LANA, J., A. F. SAN JUAN, C. P. EARNEST, C. FOSTER, and A. LUCIA. How Do Endurance Runners Actually Train? Relationship with Competition Performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, Vol. 37, No. 3, pp. 496–504, 2005. Purpose: To quantify the relationship between total training load and running performance during the most important competitions of the season (national cross-country championships, 4.175- and 10.130-km races). Methods: Eight well-trained, subelite endurance runners (age (mean \pm SD): 23 \pm 2 yr, $\dot{V}O_{2max}$: 70.0 \pm 7.3 mL·kg⁻¹·min⁻¹) performed a maximal cardiorespiratory exercise test before the training period to determine ventilatory threshold (VT) and respiratory compensation threshold (RCT). Heart rate was continuously recorded using telemetry during each training session over a 6-month macrocycle, designed to achieve peak performance during the aforementioned cross-country races, lasting from late August to the time that these races were held, that is, mid-February. This allowed us to quantify the total cumulative time spent in three intensity zones calculated as zone 1 (low intensity, lower than the VT); zone 2 (moderate intensity, between VT and RCT); and zone 3 (high intensity, above the RCT). Results: Total training time in zone 1 (4581 \pm 979 min) was significantly higher ($P < 0.001$) than that accumulated in zones 2 (1354 \pm 383 min) and 3 (487 \pm 154 min). Total time in zone 2 was significantly higher than time in zone 3 ($P < 0.05$). A correlation coefficient of $r = -0.79$ ($P = 0.06$) and $r = -0.97$ ($P = 0.008$) was found between the total training time spent in zone 1 and performance time during the short and long cross-country races, respectively. Conclusions: Our findings suggest that total training time spent at low intensities might be associated with improved performance during highly intense endurance events, especially if the event duration is \sim 35 min. Interventional studies (i.e., improving or reducing training time in zone 1) are needed to corroborate our findings and to elucidate the physiological mechanisms behind them. Key Words: TRAINING, HEART RATE, VENTILATORY THRESHOLD, RESPIRATORY COMPENSATION THRESHOLD, TRAINING IMPULSE

Although extensive research has been conducted on the scientific basis (physiological, biomechanical, or genetic factors) underlying performance during endurance sports, surprisingly little research has focused on answering two of the basic questions in the field: What is the actual physiological load undertaken by competitive endurance athletes during training sessions, and how does this training load relate to competition performance?

In the past two decades, the use of portable heart rate (HR) telemeters has allowed scientists to estimate the exercise intensity of training sessions and competitions, based

on the linear relationship that exists between HR and metabolic exercise intensity during dynamic exercise involving large muscle groups (e.g., running, cycling, swimming) (15). A method that can be used for examining physical exertion under competitive exercise conditions is obtained by partitioning intensity into different phases (or zones) according to reference HR values obtained during cardiorespiratory exercise testing. These include zone 1 (light intensity, below the ventilatory threshold (VT)), zone 2 (moderate intensity, between the VT and the respiratory compensation threshold (RCT)), and zone 3 (high intensity, above the RCT) (22,25). Although this simple and practical approach has been used to quantify exercise intensity during professional cycling races such as the Tour de France (22,25), only one report to date has examined the actual intensity of training sessions in competitive endurance athletes (34). This report has suggested that a high percentage of the training performed by elite athletes is at a comparatively low intensity (e.g., zone 1).

Another issue of widespread interest for athletes and coaches is the need for quantifying training and competition load by taking into account both exercise volume and in-

Address for correspondence: Jonathan Esteve-Lana, European University of Madrid (Polideportivo), E-28670 Villavieja de Odón, Madrid, Spain. E-mail: jonathan.esteve@fme.afd.uemas.

Submitted for publication June 2004.

Accepted for publication November 2004.

0195-9131/05/3703-0496

MEDICINE & SCIENCE IN SPORTS & EXERCISE®

Copyright © 2005 by the American College of Sports Medicine

DOI: 10.1249/01.MSS.0000155393.78744.36

tensity. Banister et al. (1,2) originally developed the concept of the training impulse (TRIMP) to integrate both intensity and volume into a single term. The original TRIMP algorithm is calculated by integrating total exercise time and each of basal, maximal, and mean exercise values of HR, respectively (2). Despite its advantages, the original TRIMP method does not take into account the aforementioned intensity zones based on reference HR values compared with various physiological thresholds, which denote changing physiological responses. To classify exercise intensity in a simple, practical manner, Foster et al. (13) recently proposed a novel approach to the original TRIMP concept by integrating total exercise volume, on the one hand, and total intensity relative to the aforementioned intensity zones, on the other.

The purpose of the current study was twofold: 1) to quantify variables indicative of total physiological load (time spent in each HR zone, TRIMP) during each training session over a long period of the season (i.e., several months) in a group of well-trained, competitive endurance runners; and 2) to determine the relationship between training load and performance during the most important competitions of the season (4.175- and 10.130-km cross-country races). For descriptive purposes only, subjects' HR were also recorded during the aforementioned competitions.

MATERIALS AND METHODS

Approach to the problem and experimental design. Several reports exist using the models of Banister et al. or Foster et al. for quantifying training or competition load in elite endurance athletes (25,28). To the best of our knowledge, no study has analyzed the possible relationship between actual training load and competition performance using either model. Foster et al. (10) demonstrated a quantitative relationship between total training load and performance changes in subelite and elite speed skaters. However, the technique of Foster et al. (13) is based on RPE, which is a relatively crude and subjective method to quantify training load. We propose that a more objective approach to the problem is to quantify relative work intensity based on laboratory-derived parameters associated with maximal exercise testing. Therefore, we have modified the schema of Foster et al. to reflect HR-defined zones associated with two simple reproducible values reflecting the VT and the RCT. Subsequently, we categorized our TRIMP model based on HR falling into one of three of the following categories: zone 1 (light intensity, below the VT), zone 2 (moderate intensity, between the VT and the RCT), and zone 3 (high intensity, above the RCT) (22,25).

Subjects. Eight competitive (national and regional [Madrid area] level, competition experience ≥ 5 yr) Spanish runners participated in the study. The mean (\pm SD) age, mass, and height were 23 ± 2 yr, 64.6 ± 3.3 kg, and 172.9 ± 4.7 cm, respectively. Their best performance in 1500- and 5000-m track races averaged 85.8 and 82.1%, respectively, of the world record. All of them were born, live, and train in the area around Madrid, Spain (~ 600 -m altitude). The institutional research

ethics committee approved the study, and the subjects provided informed consent before participation.

Main characteristics of training periodization and competition goals. We quantified the total physiological load of each training session (outlined below) from the start to the end of a 6-month period (24-wk macrocycle, lasting from late August to the time the national (Spanish) championships of cross-country races were held, in mid-February). This 6-month interval was composed of eight 3-wk mesocycles, each of which had a 2:1 load structure (i.e., 2 wk of high load followed by an "easy" week), and was divided in three main periods: preparatory (first four mesocycles (weeks 1–12)), specific (next two mesocycles (weeks 13–18)), and competitive (last two mesocycles (weeks 19–24)). The preparatory period was used for basic or foundation training (including mostly low- to moderate-intensity running and strength-training sessions). In the specific period, strength-training sessions were performed specifically during actual running (see below), and running intensity was progressively increased. The purpose of the competition period was to convert basic fitness built during the previous months to competition performance. Running volume ($\text{km}\cdot\text{wk}^{-1}$) increased through the preparatory period (to reach a maximum of 90–100 $\text{km}\cdot\text{wk}^{-1}$ in week 11), decreased during the specific period but increased again in weeks 18 and 19 (90 $\text{km}\cdot\text{wk}^{-1}$), and finally decreased during the competition period (mean of 40–50 $\text{km}\cdot\text{wk}^{-1}$). Overall, running intensity followed the opposite pattern. During the preparatory period, special emphasis was placed on zone 1 training and on workouts at RCT of gradually increasing duration (to complete a continuous 30-min bout at RCT by the end of the period). The specific period was focused on short (~ 1 min) interval workouts at $\dot{V}O_{2\text{max}}$, whereas in the competitive period, longer interval sessions (few bouts of several minutes each) were performed mostly in zone 3. Although considerable variations existed depending on the aforementioned periods of the macrocycle and the hard or easy weeks of each mesocycle, the runners' usual training schema for the 6-month period included 1–3 training sessions per week of low intensity (zone 1), 1–3 sessions per week of low to moderate intensity (zone 1 and zones 1–2), 1–2 sessions per week with a core part in zone 2, and 2 hard sessions per week including interval workouts at high intensities (zones 2–3 and zone 3). Training usually included 1–2 strength-training sessions per week, consisting of weight lifting and circuit weight training during the preparatory period, and specific strength sessions during the specific period (i.e., short running intervals on steep hills or muddy terrain or using weight vests). In the competition period, subjects performed one easy session per week of weight lifting.

At the end of the preparatory period and during the specific period and during the competition period, the runners participated in six and two cross-country races (distances ranging between 5 and 10 km), respectively (excluding the two target competitions that are described below). HR was continuously monitored during these preparatory races and included in the quantification of training loads

(i.e., total training time in the three intensity zones, total training volume, and TRIMP score) (see section on quantification of exercise load in training and competition). Although these competitions were not the target ones, since the subjects had not yet reached their peak performance level, these races were used as an important part of their training schedule and runners were required to perform as well as possible. A schematic representation of the training load on a week-by-week basis over the period of the study is presented in Figure 1.

The 6-month macrocycle was aimed at achieving peak competition performance during the national (Spanish) championships of cross-country races (short distance (4.175 km) or long distance (10.130 km)) held in mid-February, at the end of the 6-month period (with 5 d of rest between races). Both races were held over a hilly terrain (i.e., ~1 and ~2.5 km with ~8% upgrade for the short- and long-distance races, respectively).

Laboratory testing. The subjects reported to the laboratory (~600-m altitude) at the start of the 6-month period to perform a physiological (ramp) test on a treadmill (Technogym Run Race 1400 HC, Gambettola, Italy) for VT and RCT determination. After a general warm-up, starting at 11 km·h⁻¹, running velocity was increased by 0.5 km·h⁻¹ every 30 s until volitional exhaustion. During the tests, gas exchange data were collected continuously using an automated breath-by-breath system (Vmax 29C, SensorMedics, Yorba Linda, CA). The following variables were measured: oxygen uptake ($\dot{V}O_2$), pulmonary ventilation ($\dot{V}E$), ventilatory equivalents for oxygen ($\dot{V}E \cdot \dot{V}O_2^{-1}$) and carbon dioxide ($\dot{V}E \cdot \dot{V}CO_2^{-1}$), and end-tidal partial pressure of oxygen ($P_{\text{ET}}O_2$) and carbon dioxide ($P_{\text{ET}}CO_2$).

Maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\text{max}}$) was recorded as the highest $\dot{V}O_2$ value obtained for any continuous 1-min period during the tests. At least two of the following criteria were also required for the attainment of $\dot{V}O_{2\text{max}}$: a plateau in $\dot{V}O_2$ values despite increasing velocity, a respiratory exchange ratio ≥ 1.15 , or the attainment of a maximal HR value (HR_{max}) above 95% of the age-predicted maximum. The VT

was determined using the criteria of an increase in both $\dot{V}E \cdot \dot{V}O_2^{-1}$ and $P_{\text{ET}}O_2$ with no increase in $\dot{V}E \cdot \dot{V}CO_2^{-1}$, whereas the RCT was determined using the criteria of an increase in both $\dot{V}E \cdot \dot{V}O_2^{-1}$ and $\dot{V}E \cdot \dot{V}CO_2^{-1}$ and a decrease in $P_{\text{ET}}CO_2$ (24). Two independent observers detected VT and RCT. If there was disagreement, the opinion of a third investigator was obtained (24). HR (beats·min⁻¹) was continuously monitored during the tests using a telemeter (Xtrainer Plus; Polar Electro OY, Kempele, Finland).

Quantification of exercise load in training. For all the subjects, HR was continuously measured (every 5 s) during each training session (with no missing data) and preparatory competitions (as mentioned above) over the 6-month macrocycle to quantify the following variables: 1) total time spent in each of the three intensity zones (zone 1: HR below the HR at VT; zone 2: HR between the HR at VT and the HR at RCT; zone 3: HR above the HR at RCT); and 2) total load (TRIMP score) as explained below. (A total of ~1000 training sessions were analyzed.) As mentioned above, in six and five runners of the total of eight subjects who participated in this study, we also recorded performance time and HR during the target short and long cross-country races, respectively, which were held at the end of the 6-month period. (Three subjects participated in both races). Previous research on trained endurance athletes has shown that HR values at VT and RCT determined during previous laboratory testing remain stable over the season despite significant improvements in the workload eliciting both thresholds (24). Thus, a single test early during the training period might suffice for training monitoring based solely on target HR values at VT and RCT (24).

We estimated total exercise load (i.e., intensity \times volume) accumulated in each training session using a novel approach to the TRIMP based on a method recently developed by Foster et al. (13). This method, which has been recently reported to estimate total exercise load in 3-wk professional cycling races (25), uses HR data during exercise to integrate both total volume, on the one hand, and total intensity relative to three intensity zones, on the other. Briefly, the score for each zone is computed by multiplying the accumulated duration in this zone by a multiplier for this particular zone (e.g., 1 min in zone 1 is given a score of 1 TRIMP, 1 min in zone 2 is given a score of 2 TRIMP, and 1 min in zone 3 is given a score of 3 TRIMP). The total TRIMP score is then obtained by adding the results of the three zones.

Performance tests during the training period. To assess improvements in subjects' endurance fitness during the 6-month macrocycle, the runners performed the following test on a flat grass running loop at weeks 7 and 20, respectively. (The distance of the loop was calculated using a measuring wheel (Trumeter Measure Meter, Manchester, UK) (measurement error < 0.5 m per each 100-m interval). The test consisted of three running bouts of 15 min, each performed on a different day, during which subjects were instructed to maintain the running speed eliciting a HR value of 5 beats·min⁻¹ below the HR at VT (running speed in zone 1), equidistant between the HR at VT and RCT (running speed in zone 2), and 1

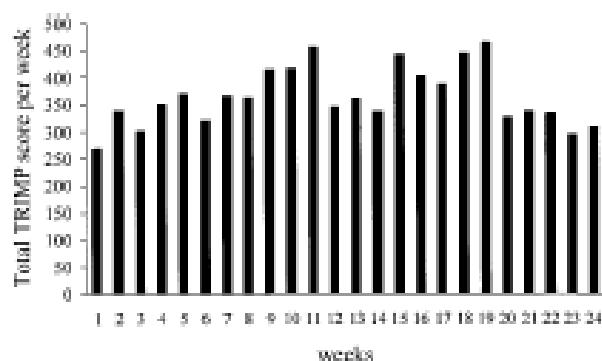


FIGURE 1—Schematic representation of the average training impulse (TRIMP) of all the subjects ($N = 8$) on a week-by-week basis over the 6-month period of the study (24-wk macrocycle, ending from late August to the time that the national (Spanish) championships of cross-country races were held (i.e., mid-February)). See text for explanation of TRIMP.

beat·min⁻¹ above the HR at RCT (running speed in zone 3). This allowed us to determine whether the mean running speed in the three intensity zones improved over the training period. In weeks 7, 20, and 24, the subjects performed a 20-m speed test and a 300-m test to determine their ability to generate maximal running velocities and both maximal vertical squat jump (SJ), from a starting position of 90° for the knee angle, and countermovement jump (CMJ) tests to assess the dynamic explosive force characteristics of their leg muscles. In each testing battery, the subjects performed the 20-m speed test twice, and the better trial was taken for analysis, whereas they performed the 300-m test only once. Both tests were performed on a 400-m running track. The 20-m running times were measured by two photocell gates (Telemecanique, France) connected to an electronic timer, and the 300-m performance time was measured with a digital timer (Oregon Scientific SL928M, Portland, OR). The jump tests were performed on a force platform (Bosco System Devices, Ano Glyfada, Greece), and subjects' hands were kept on the hips during each jump. The rise of the center of gravity (cm) was calculated from the flight time. Two maximal jumps were recorded for both SJ and CMJ, and the maximum in terms of height was taken. In all tests, external verbal encouragement was given to each subject.

Statistical analysis. The Kolmogorov-Smirnov test was applied to ensure a Gaussian distribution of the data. We report mean (\pm SD, 95% confidence intervals (95%CI) and coefficient of variation (CV)) data for total time spent in each of the three intensity zones and total TRIMP score, respectively, accumulated over the total 6-month period. Repeated-measures ANOVA was also used to compare the total time spent in each of the three zones over the 6-month training period and the results of the performance tests (300-m test, 20-m speed test, SJ, and CMJ) held in weeks 7, 20, and 24. The Tukey test was used as a *post hoc* test. The results of the fitness running tests in zones 1, 2, and 3, held in weeks 7 and 20, were compared with a Wilcoxon's test. Pearson product-moment correlation coefficients (and the corresponding SEE and 95%CI) were calculated to determine whether there was a significant relationship between total training time, total time, and total training distance (km) in each of the three intensity zones over the 6-month macrocycle, on one hand, and performance time in short- and long-distance cross-country races (i.e., total time to complete each race). Independent variables were the variables indicative of training loads, whereas performance time was the dependent variable. We also calculated the relationship between accumulated TRIMP score from the start to the end of the 6-month period and competition performance time, with a Spearman's rho test. The level of significance was set at $P \leq 0.05$ for all statistical analyses.

RESULTS

Laboratory tests. The average $\dot{V}O_{2max}$ of the subjects was 70.0 ± 7.3 mL·kg⁻¹·min⁻¹ (95%CI: 62.8–75.1; CV: 10.4%). The VT and the RCT occurred at $61.1 \pm 4.2\%$ (95%CI: 55.2–69.1; CV: 6.9%) and $85.1 \pm 4.2\%$ (95%CI: 81.6–88.7; CV: 4.9%) of $\dot{V}O_{2max}$, respectively. HR at VT

and RCT averaged 140 ± 15 beats·min⁻¹ (95%CI: 126–154; CV: 10.7%) and 171 ± 9 beats·min⁻¹ (95%CI: 163–179; CV: 5.3%), respectively, or ~ 71 and $\sim 87\%$ of HR_{max} (197 ± 4 beats·min⁻¹; 95%CI: 183–200; CV: 2.0%) obtained during the tests.

Quantification of training load. None of the subjects were injured or sick during the training period and showed no signs of chronic fatigue/overtraining (e.g., decreased maximal HR or chronic muscle soreness). All the subjects were able to complete the majority of the training sessions over the 6-month program as originally planned. The cumulative total duration of training sessions over the 6-month period in which we recorded HR data amounted to ~ 110 h, during which athletes completed a total of ~ 1600 km (i.e., ~ 70 km·wk⁻¹). Mean total and percent total time spent in each of the three intensity zones over the 6-month period are shown in Figure 2. Significant differences were found between total time in zone 1 and total time in both zones 2 ($P < 0.001$; statistical power: 0.98) and 3 ($P < 0.001$; statistical power: 0.99) and between total time in zone 2 and total time in zone 3 ($P < 0.05$; statistical power: 0.79).

Total TRIMP score accumulated over the 6-month period averaged 8750 ± 1398 TRIMP (95%CI: 7581–9919; CV: 16.0%) (i.e., ~ 365 TRIMP·wk⁻¹).

Performance tests. The running speed in zones 2 and 3 significantly improved in week 20 compared with week 7 ($P < 0.05$) (Table 1), which indicated an increase in endurance fitness over the training period. No changes were found in the other tests (20-m speed test, 300-m test, SJ, and CMJ), except for a lower performance in the SJ test in week 24 compared with the start of the training period.

Quantification of performance during competition. Performance time averaged 788 ± 33 s (95%CI: 755–823; CV: 4.2%) (mean running pace of 3 min 10 s·km⁻¹)

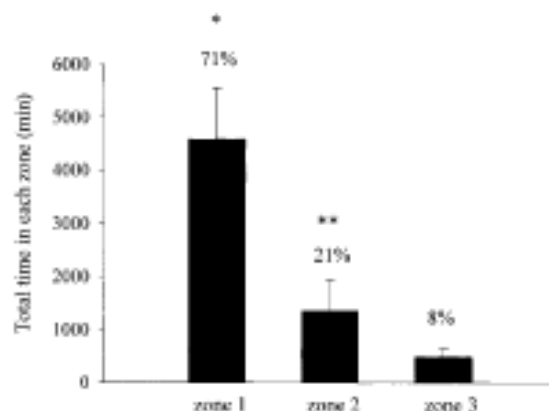


FIGURE 2—Mean \pm SD values of total time spent in each intensity zone by all the subjects ($N = 8$) over the 6-month period of the study based on heart rate (HR) data. Percentage time spent in each zone is also showed on top of bars. Zone 1 (low intensity): HR below HR value eliciting the ventilatory threshold (VT); zone 2 (moderate intensity): HR between HR value eliciting the VT and the respiratory compensation threshold (RCT), respectively; zone 3 (high intensity): HR above HR value eliciting the RCT. * $P < 0.001$ for zone 1 vs both zones 2 and 3; ** $P < 0.05$ for zone 2 vs zone 3. 95%CI and CV for zones 1, 2, and 3 are 3763–5399 min, 21.4%; 866–1841 min, 48.1%; and 359–616 min, 31.6%, respectively.

TABLE 1. Results of the performance tests.

	Week 7	Week 20	Week 24
Running speed in zone 1 ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	14.0 \pm 0.4	14.3 \pm 0.6	—
Running speed in zone 2 ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	15.3 \pm 0.9	16.3 \pm 0.9*	—
Running speed in zone 3 ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	16.7 \pm 1.2	18.4 \pm 0.5*	—
300-m test (s)	42.8 \pm 2.2	42.0 \pm 1.8	43.1 \pm 2.3
20-m speed test (s)	2.47 \pm 0.09	2.51 \pm 0.08	2.47 \pm 0.07
SJ (cm)	32.5 \pm 5.1	33.2 \pm 4.4	30.8 \pm 5.2†
CMJ (cm)	33.4 \pm 7.0	34.0 \pm 4.4	33.0 \pm 6.3

Data are shown as mean \pm SD. Running speed in zone 1 (running speed eliciting a heart rate (HR) value 5 beats $\cdot\text{min}^{-1}$ below the HR at the ventilatory threshold (VT)); running speed in zone 2 (running speed eliciting a HR value equivalent to the HR at VT and respiratory compensation threshold (RCT)); running speed in zone 3 (running speed eliciting a HR value 1 beats $\cdot\text{min}^{-1}$ above the HR at RCT); SJ, squat jump; CMJ, counter movement jump.

* $P < 0.05$ for week 7 vs week 20.

† $P < 0.05$ for week 7 vs week 24.

during the short-distance (4.175 km) cross-country race and 2114 ± 78 s (95%CI: 2017–2212; CV: 3.7%) (mean running pace of $3 \text{ min } 32 \text{ s}\cdot\text{km}^{-1}$) during the long-distance (10.130 km) cross-country race. Runners started both races at 140–150 beats $\cdot\text{min}^{-1}$ ($\sim 75\% \text{HR}_{\text{max}}$) due to both competition stress and previous active warm-up, and usually reached zone 3 in less than 1–2 min (see Fig. 3 for an example). Mean HR during the short- and long-distance race averaged $95 \pm 2\%$ (95%CI: 92–97; CV: 2.1%) and $92 \pm 2\%$ (95%CI: 89–94; CV: 2.2%) of the subjects' HR_{max} , respectively.

Relationship between training load and competition performance. We observed a negative correlation coefficient of $r = -0.79$ ($P = 0.06$; SEE: 22 s; 95%CI: -0.98 to 0.06) for the relationship between the total training time spent in zone 1 and performance time during the short-distance cross-country race (Fig. 4). A significant correlation of $r = -0.79$ was also found for the total training distance (km) covered in zone 1 during training and performance time during the same event ($P = 0.06$; SEE: 22 s; 95%CI: -0.98 to 0.06).

We observed a significant negative correlation between total training time ($r = -0.97$; $P = 0.008$; SEE: 23 s; 95%CI: -1.00 to -0.56) and total training distance (km) covered in zone 1 ($r = -0.97$; $P = 0.006$; SEE: 22 s;

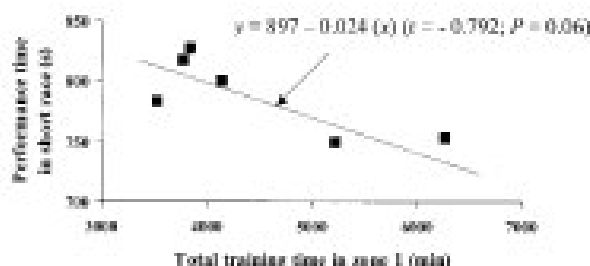


FIGURE 4—Relationship between total time accumulated in zone 1 (low intensity) during training sessions and performance time during the short (4.175 km) cross-country race. See Figure 2 for quantification of zone 1. Both training and competition data are only from the six subjects who participated in the short race (three of them also participated in the long race).

95%CI: -1.00 to -0.56) and performance time during the long-distance cross-country race (Fig. 5). No other significant correlations were found.

DISCUSSION

The main findings of our study were twofold. First, these regional/national class endurance runners spent the majority (71%) of their training time at low intensities (zone 1 (i.e., below $\sim 60\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ or $\sim 70\% \text{HR}_{\text{max}}$)). The proportion of moderate (60 – $85\% \dot{V}O_{2\text{max}}$) and high-intensity training ($>85\% \dot{V}O_{2\text{max}}$) was significantly lower (i.e., 21 and 8%, respectively). On the other hand, there was a relationship between cumulative training time at low intensities (zone 1) and endurance performance during events, which are completed at very high intensities (i.e., 30 min of continuous exercise in zone 3 or $>85\% \dot{V}O_{2\text{max}}$). Performance during such events does not seem to be associated with total training time spent at medium or high intensities (zones 2 and 3, respectively).

Our descriptive study is not without methodological limitations. The novelty of our study, especially the fact that we

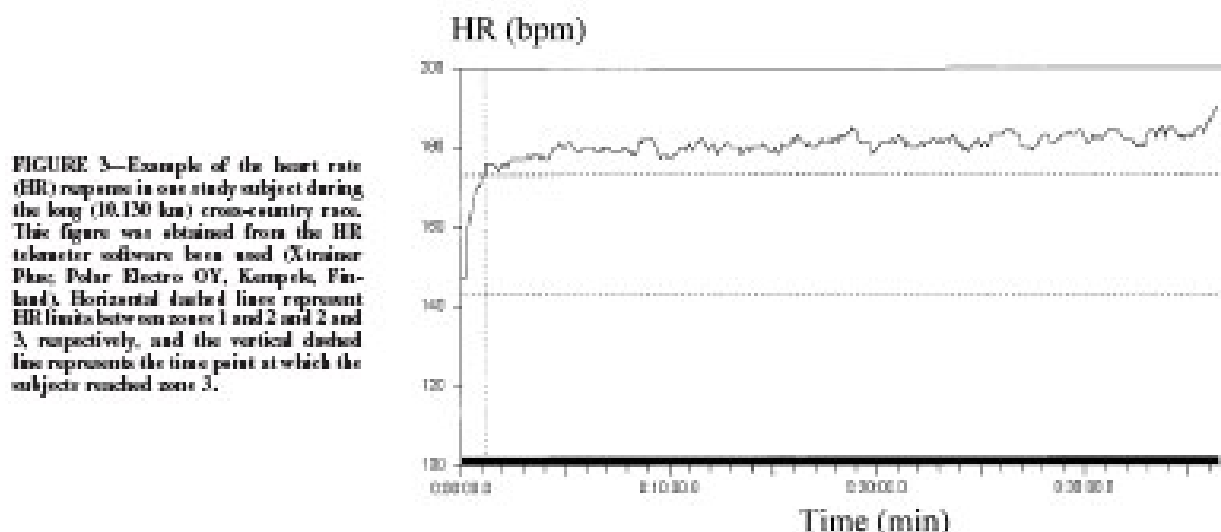


FIGURE 3—Example of the heart rate (HR) responses in one study subject during the long (10.130 km) cross-country race. This figure was obtained from the HR telemetry software been used (Xtrainer Plus; Polar Electro OY, Kempele, Finland). Horizontal dashed lines represent HR limits between zones 1 and 2 and 2 and 3, respectively, and the vertical dashed line represents the time point at which the subject reached zone 3.

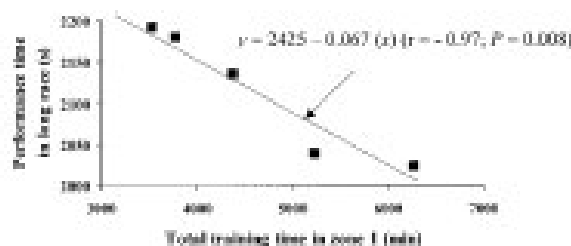


FIGURE 5—Relationship between total time accumulated in zone 1 (low intensity) during training sessions and performance time during the long (10.130 km) cross-country race. See Figure 2 for quantification of zone 1. Both training and competition data are only from the five subjects who participated in the long race (three of them also participated in the short race).

collected actual HR data to quantify training loads during a whole season, would overcome, at least partly, the limitations described. First, caution is indeed needed when interpreting our correlation results, as a cause-and-effect relationship cannot be inferred from this statistical approach. Further, interventional studies are needed to corroborate our findings and to prove the existence of an actual cause-and-effect relationship between total training time spent in zone 1 and performance during endurance running events (i.e., increasing or decreasing the total time spent in the three intensity zones in different groups of athletes with similar training background and competitive level). On the other hand, estimation of exercise intensity with HR data is not without limitations itself. The major criticism would be the phenomenon of cardiac drift (i.e., the slow rise in HR that occurs during moderate to high constant workloads, when exercise duration is prolonged for >20 min (15)). The cardiac drift is especially evident if environmental heat stress is high. In this regard, the current study was conducted during fall and winter months, and temperatures were not high in any of the training sessions over the study period (i.e., consistently <15°C). Nonetheless, an upward HR drift inevitably indicates additional stress to the body, whether this stress is due to dehydration or mild heat stress (15). In addition, cardiac drift would bias HR recordings toward a higher percentage of time in zones 2 and 3, which is opposite from the findings of this study. Finally, despite the limitations of HR records, no other means of continuously and noninvasively examining the exercise intensity in athletes during both running training and competition are currently available.

In our study, HR was measured during specific races for descriptive purposes only (i.e., to corroborate that the subjects were performing at sufficient intensity in both events). This is an important consideration for a research design such as ours, which seeks to examine the relationship between training loads and actual competition performance. However, a potential methodological drawback still comes from the fact that we did not record HR data during the minutes before both races, when anticipatory increases in HR before competition could inflate the response of this variable during competition, especially during its first minutes and thus

might potentially result in an overestimation of actual exercise race intensity (27). Our runners started both target races with high HR values (i.e., 140–150 beats·min⁻¹ or ~75% HR_{max}) (Fig. 3). These increased values are attributable, at least partly, to previous active warm-up, a common practice before all competition events that accelerates $\dot{V}O_2$ and HR kinetics at the onset of exercise (5). They might be also explained by the mental stress of competition, as it is known that sympathetic activity is usually enhanced in response to emotional stress (26).

Nevertheless, previous research with simulated laboratory competitions (i.e., without the mental stress of real competitive situations) has shown that the HR of trained endurance athletes increases quickly from the start of exercise (e.g., from 93 to 175 beats·min⁻¹ (or 95% HR_{max})) in less than 90 s (14). Moreover, a fast time response of HR during the first minutes of a highly demanding exercise bout is to be expected in athletes, as this is a typical adaptation to endurance training (29), and the cardiac pump must match the increase in blood flow that occurs in endurance-adapted working muscles at the onset (first 1–2 min) of exercise (16). On the other hand, the high mean HR values that we found during specified competitions (means of 95 and 92% of HR_{max} for the short- and long-distance race, respectively, or zone 3 during most competition duration) are in agreement with previous research on simulated, noncompetitive trials lasting from a few minutes to ~1 h (3,35,37,40). To sustain race pace during these types of efforts, trained endurance athletes must maintain very high HR values (≥90% HR_{max}), similar to those reported in our target competitions. Finally, a recent study by Jellamo et al. (17) with elite athletes has shown that, although the stress of competition activates central structures, leading to the stimulation of some hormonal systems as the hypothalamic–pituitary–suprarenal axis, this enhanced response is dissociated with autonomic cardiac regulation, which seems to remain unchanged. As a result, HR response would not differ much between simulated or actual competitions, at least in well-trained athletes like our subjects. In any case, future research in the field should include prerace HR data to account for any potential influence of stress-related anticipatory HR response. Regardless of these observations, this phenomenon does not affect our study findings in that our study demonstrates a strong relationship between zone 1/baseline training and race time.

Although several excellent reports are available in the literature on the training characteristics of elite endurance runners, particularly African athletes (4,7,33), to the best of our knowledge, despite the simplicity of HR data collection, there is only one other study that has described the training load for a group of competitive athletes by using three intensity zones that are delimited by target HR values (34). Our results are in substantial agreement with those of the study on elite Norwegian junior skiers (over the duration of a month) in which 91% of all training was completed in zone 1. Although Robinson et al. (31) reported the HR data of each training session over a 6- to 8-wk period in endurance runners with a competitive/training level similar to that

of our subjects, training intensity was not partitioned into different zones. Instead, HR data were averaged, and mean training intensity was estimated as a percentage of the $\dot{V}O_{2max}$ obtained in a previous laboratory test. The results showed a mean training intensity of 64% $\dot{V}O_{2max}$. To date, most studies have described training characteristics using running speed data reported in daily training logs or questionnaires instead of quantifying actual HR data. We believe that these techniques introduce several complications. First, reporting exercise intensity in terms of running speed could potentially underestimate exercise intensity due to the so-called slow component, that is, the gradual increase in $\dot{V}O_2$ occurring after the third minute of exercise bouts performed above the VT, despite power output or running speed remaining constant (41). In addition, the validity of training logs or questionnaires for estimating actual training intensity has not been clearly documented.

Several reports are available regarding the training intensity of endurance athletes using training logs or questionnaires. With some exceptions (mostly African runners), the current findings and those of previous research seem to indicate that low-intensity training accounts for the majority of training time in endurance athletes. Coetzer et al. (7) estimated the training intensity of black and white South African male runners with a higher competition level than that of our subjects (i.e., best 10-km time <30 min). The training volume of white runners was slightly higher than that of our subjects (~ 80 km \cdot wk $^{-1}$ vs 70 km \cdot wk $^{-1}$, respectively) and the training intensity (estimated by interview) was comparable (i.e., nearly 85% of total training performed at intensities <80% $\dot{V}O_{2max}$). Black runners, however, spent nearly 36% of their total training (90 km \cdot wk $^{-1}$) at intensities >80% of $\dot{V}O_{2max}$. Billat et al. (4) recently estimated that ~ 10 –16% of training volume (~ 130 –170 km \cdot wk $^{-1}$) for male and female Kenyan runners was performed at intensities at or above the lactate threshold (i.e., \geq VT). This is less than the time for the runners in our study (29% (zones 2 and 3) above VT). However, the total volume of high-intensity training (~ 20 km \cdot wk $^{-1}$) is in the same general range as observed in the current study. In a previous report, Sakin et al. (33) described (from training logs/questionnaires) that the training programs of several Kenyan elite runners (~ 100 km \cdot wk $^{-1}$) included very little low-intensity work and was characterized mostly by high-intensity sessions. As mentioned above, however, no actual training HR data using the triphasic model are available in endurance runners. Seiler and Kjerland (34) observed that in elite Norwegian junior cross-country skiers, 91, 6, and 3% of the training time was performed in zones 1, 2, and 3, respectively. However, when the HR records were analyzed by the session-goal approach, which corrects for the extensive period of low HR during recovery intervals of high-intensity days, 75, 8, and 17% of workouts were conducted nominally in zones 1, 2, and 3, respectively. This is very similar to our results. Foster et al. (10) also evaluated training load using the session RPE method and the pattern of lactate accumulation. These results also suggested that the general pattern of training approximates 75% low-intensity training. This general pat-

tern of a high percentage of low-intensity training is also reflected in a retrospective analysis of the training of elite Norwegian rowers over the past three decades of the 20th century (9). The training intensity of professional cyclists obtained during the main part of the season (November–May) has been described with training logs using the three HR zones reported here (23). Interestingly, the percentage of total training time (~ 25 h \cdot wk $^{-1}$) spent by cyclists in zones 1, 2, and 3 was similar (~ 75 , ~ 15 , and $\sim 10\%$, respectively) during winter-spring months to the values we report here (71, 21, and 8%, respectively). Similarly, the percentage of time spent in zones 1, 2, and 3 during 3-wk races as the Tour de France (total duration ~ 100 h) approaches 70, 23, and 7%, respectively (22). Thus, the current data and those of previous research (9,22,34) suggest that well-trained endurance athletes tend to spontaneously pace themselves in a manner such that they spend most training time (or competition time, in the case of continuous long-term competitions such as 3-wk tour races) in zone 1, with a considerably lower contribution of zone 2 and especially zone 3.

The actual training data presented here in endurance athletes showing that 1) low-intensity training accounts for the majority of training time and 2) there is an association between total cumulative training time at low intensities (zone 1) and endurance performance during events held at very high intensities (i.e., 30 min at $>85\%$ $\dot{V}O_{2max}$) are in apparent disagreement with some classic studies showing that physiological or performance improvements are associated with high-intensity training sessions (8,39). Steady-state sessions at an intensity of at least 80–90% $\dot{V}O_{2max}$ (i.e., approximately RCT) have traditionally been considered to be the optimal intensity based on the results from previous studies (30,39). Furthermore, one distinguishable feature of the best endurance runners of the modern era (i.e., East Africans) is the high intensity of their training sessions, as mentioned above, although this trend is not evident in the data from Billat et al. (4). In contemporary times, many Kenyan runners are trained by former Kenyan champions, who recommend interval workouts at velocities slightly higher than in competitions (4). Such interval training runs at intensities of $\dot{V}O_{2max}$ and higher could improve the aerobic potential of type IIa muscle fibers, which in turn could become more fatigue resistant. Thus, training speed ensures that the cardiovascular demand is at its maximum, but it also determines the generation of muscular force that is important for performance, especially during the last 10–20% of races (4). Although our subjects performed some interval workouts in zone 3 (i.e., at velocities eliciting maximal HR and possibly $\dot{V}O_{2max}$), we found no relationship between total training time spent at this workload and performance during actual competition (which was performed mostly in zone 3, at near-maximal intensities). In line with our findings, most of the training data available on white endurance athletes using HR as a marker of training intensity has shown that the preferred average intensity of training sessions is below the theoretical optimal intensity (9,23,31,34). The reasons for our findings are not immediately apparent.

We found no relationship between total training load (i.e., volume \times intensity computed as TRIMP score) and competition performance, in contrast to the results of Foster et al. (10), who found a saturation curve between training load and cycle time trial performance, which emphasizes the somewhat surprising importance of low-intensity training background in competition performance.

The observation that the better runners performed relatively more of their training at lower intensities must be taken in context, since it does not necessarily imply that the best way to improve performance is to train at low intensities. It might be suggested that in a group of runners training together, the better runners will be less challenged while performing the same training bouts and thus have lower percentages of time in the higher HR zones. However, although the runners in this study were all coached by the same person, they did not perform their training as a group. Therefore, the explanation that the same training was easier for the better runners does not seem likely in this case. Studies from both Australia (18) and South Africa (36) in high-level cyclists have demonstrated that training performance responds positively to short-term increases in training intensity. These same studies do not support great amount of importance of one type of intensified training over another, suggesting that the impact of intensified training may be quite general. These data support earlier findings from Daniels et al. (8), who demonstrated a very general response to intensified training. The implication of these findings is that adaptations to high-intensity training occur quite rapidly and that the dose-response characteristics of high-intensity training may saturate at fairly low volumes of high-intensity training. To our knowledge, there are few data addressing how short-term training adaptations to high-intensity training might occur. It would be most reasonable to suggest that central circulatory changes might be able to respond rapidly to changes in training load, because changes in mitochondrial number or capillary density in type II muscle fibers may take some weeks to occur (32).

We believe that the most likely explanation for the comparatively small amount of high-intensity training performed by serious athletes has to do with the likelihood of downregulation of their sympathetic nervous system in re-

sponse to a large volume of high-intensity exercise. There is evidence that the activity of the sympathetic nervous system is reduced after severe and prolonged training and competition in athletes, consistent with a hormonal exhaustion syndrome (21,25). Lehmann et al. (19) reported decreases in catecholamine secretion in overtrained athletes. Although beta-receptor density and catecholamine sensitivity are generally higher in athletes than in sedentary individuals (20), heavy training produces evidence of catecholamine depletion (19). This pattern may be consistent with a reduced sensitivity to catecholamines, as demonstrated in chronic overstimulation or exhaustive stress (6,38). Since one consequence of a reduced sensitivity to catecholamines might be reductions in cardiac output and the ability to selectively divert blood flow to the active musculature and since a drive to downregulate beta receptors would be expected only in the presence of chronic elevations of catecholamines, it is possible that there is an upper limit to the amount of high-intensity training that can be tolerated over any period of time without risking downregulation of the sympathetic nervous system. This concept awaits experimental verification. However, evidence in support of this concept may be found in the fixed TRIMP values and minutes of zone 3 exercise in the relatively longer Tour de France and the relatively shorter Vuelta a España (25).

In summary, competitive runners spent most of their training at low intensities. Our findings suggest that total training time spent at low intensities might be associated with improved performance during highly intense endurance events, at least if the event duration is \sim 35 min. Interventional studies (i.e., increasing or reducing athletes' total training time in zone 1) are needed to corroborate our findings. On the whole, we believe that the results from this study provided evidence that athletes might engage in a form of pacing that occurs over a very long period of time. Just as athletes must distribute their energetic resources within a competition (11,12,25) to prevent substrate depletion or metabolite accumulation, it appears that they must also perform a certain level of pacing over long periods of time, so that the balance of the training stress and training adaptations remains favorable.

REFERENCES

1. BASTIEN, E. W. Modeling elite athletic performance. In *Physiological Testing of Elite Athletes*, H. J. Green, J. D. McDougall, and H. Wenger (Eds.) Champaign, IL: Human Kinetics, 1991, pp. 403-424.
2. BASTIEN, E. W., J. B. CARTER, and P. C. ZAROVAN. Training theory and taper: Validation in triathlon athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* 79:182-191, 1999.
3. BELLET, V. L., A. DESBALLE, J. SLAWINSKI, M. PATA, and J. P. KORALCZYK. Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33:2089-2097, 2001.
4. BELLET, V., P. M. LEBLANC, A. M. HEDGAR, M. H. LACROIX, D. SALON, and J. P. A. KORALCZYK. Training and bioenergetic characteristics in elite male and female Kenyan runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 35:297-304, 2003.
5. BIRCH, D. Warm up II: performance changes following active warm up and how to structure the warm up. *Sports Med.* 33:483-498, 2003.
6. BRONN, O. E., A. DAHL, and N. O'HARA. Beta adrenoceptor changes in human lymphocytes induced by dynamic exercise. *Neuropharmacology Arch. Pharmacol.* 325:190-192, 1984.
7. CHIRIAS, P., T. D. NOSSA, B. SVENSSON, et al. Superior fatigue resistance of elite black South African distance runners. *J. Appl. Physiol.* 75:1822-1827, 1993.
8. DANIELS, J. T., R. A. YARBROUGH, and C. FORRE. Changes in $\dot{V}O_{2max}$ and running performance with training. *Eur. J. Appl. Physiol.* 38:249-254, 1978.
9. FROSTBERG, A., and K. S. SEAMA. Training and performance characteristics among Norwegian international elite rowers 1970-2001. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 14:303-310, 2004.
10. FORRE, C., E. DAVAN, L. HARRIS, A. C. SERRON, and R. WILSON. Athletic performance in relation to training load. *Wirc. Med. J.* 95:370-374, 1996.

11. FOSTER, C., J. J. DEKONING, F. HETTINGA, et al. Effect of competitive distance on energy expenditure during simulated competition. *Int. J. Sports Med.* 25:198-204, 2004.
12. FOSTER, C., J. J. DEKONING, F. HETTINGA, et al. Pattern of energy expenditure during simulated competition. *Med. Sci. Sports Exerc.* 35:826-831, 2003.
13. FOSTER, C., J. A. FLOREANO, J. FRANKLIN, et al. A new approach to monitoring exercise training. *J. Strength Cond. Res.* 15:109-115, 2001.
14. FOSTER, C., M. A. GREEN, A. C. SNYDER, and N. N. THOMPSON. Physiological responses during simulated competition. *Med. Sci. Sports Exerc.* 25:877-882, 1993.
15. GELMAN, M. B. The use of heart rate to monitor the intensity of endurance training. *Sports Med.* 21:73-79, 1996.
16. HUGHSON, R. L., and M. E. TCHIRAKOVSKY. Cardiovascular dynamics at the onset of exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31:1005-1010, 1999.
17. IELLAMO, F., F. PIGOZZI, A. PARISI, et al. The stress of competition dissociates neural and cortisol homeostasis in elite athletes. *J. Sports Med. Phys. Fitness* 43:539-545, 2003.
18. LAURSEN, P. B., C. M. SHING, J. M. PEAKE, J. S. COOMES, and D. G. JENKINS. Interval training program optimization in highly trained endurance cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34:1801-1807, 2002.
19. LEHMANN, M., P. BALMGARTL, C. WIESACK, et al. Training-overtraining: Influence of a defined increase in training volume vs training intensity on performance, catecholamines and some metabolic parameters in experienced middle and long-distance runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 64:169-177, 1992.
20. LEHMANN, M., H. H. DICKHUTH, P. SCHMID, H. PORZIG, and J. KEUL. Plasma catecholamines, beta adrenergic receptors, and isoproterenol sensitivity in endurance trained and non-endurance trained volunteers. *Eur. J. Appl. Physiol.* 52:362-369, 1984.
21. LUCIA, A., B. DIAZ, J. HOYOS, et al. Hormone levels of world class cyclists during the Tour of Spain stage race. *Br. J. Sports Med.* 35:424-430, 2001.
22. LUCIA, A., J. HOYOS, A. CARVAJAL, and J. L. CHICHARRO. Heart rate response to professional road cycling: The Tour de France. *Int. J. Sports Med.* 20:167-172, 1999.
23. LUCIA, A., J. HOYOS, J. PARDO, and J. L. CHICHARRO. Metabolic and neuromuscular adaptations to endurance training in professional cyclists: A longitudinal study. *Jpn. J. Physiol.* 50:381-388, 2000.
24. LUCIA, A., J. HOYOS, M. PEREZ, and J. L. CHICHARRO. Heart rate and performance parameters in elite cyclists: A longitudinal study. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32:1777-1782, 2000.
25. LUCIA, A., J. HOYOS, A. SANTALLA, C. EARNEST, and J. L. CHICHARRO. Tour de France vs Vuelta a España: Which is harder? *Med. Sci. Sports Exerc.* 35:872-878, 2003.
26. LUCINI, D., G. NORBIATO, M. CLERCHI, and M. PAGANI. Hemodynamic and autonomic adjustments to real life stress conditions in humans. *Hypertension* 39:184-188, 2002.
27. MCARDLE, W. D., G. F. FOGLIA, and A. V. PATTI. Telemetered cardiac response to selected running events. *J. Appl. Physiol.* 23:566-570, 1967.
28. PADILLA, S., I. MIJKA, J. ORRANASOS, J. SANTIBERAN, F. ANGILO, and J. J. GOMEZ. Exercise intensity and load during mass-start stage races in professional road cycling. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33:796-802, 2001.
29. PHILLIPS, S. M., H. J. GREEN, M. J. MACDONALD, and R. L. HUGHSON. Progressive effect of endurance training on $\dot{V}O_2$ kinetics at the onset of submaximal exercise. *J. Appl. Physiol.* 79:1914-1920, 1995.
30. PREST, J. W., and R. D. HAGAN. The effect of maximum steady state pace training on running performance. *Br. J. Sports Med.* 21:18-21, 1987.
31. ROBINSON, D. M., S. M. ROBINSON, P. A. HUME, and W. G. HOOKING. Training intensity of elite male distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 23:1078-1082, 1991.
32. SALTIN, B., and P. D. GOLLNICK. Skeletal muscle adaptability: significance for metabolism and performance. In: *Handbook of Physiology, Sec. 10, Skeletal Muscle*, L. D. Peachy (Ed.). Baltimore: Williams & Wilkins, 1983, pp. 555-631.
33. SALTIN, B., H. LARSEN, N. TERRADOS, et al. Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 5:209-221, 1995.
34. SILEN, K. S., and G. O. KIERLAND. Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: Is there evidence for an 'optimal' distribution? *Scand. J. Med. Sci. Sports* (in press).
35. SNEKAL, G., S. P. VON DUILLARD, R. POKAN, et al. Respiratory gas exchange and lactate measures during competitive orienteering. *Med. Sci. Sports Exerc.* 35:682-689, 2003.
36. STEFFO, N. K., J. A. HAWLEY, S. C. DENNIS, and W. G. HOOKING. Effects of different interval training programs on cycling time-trial performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31:736-741, 1998.
37. SWENSON, T. C., C. R. HARNISH, L. BERMAN, and B. A. KELLER. Noninvasive estimation of the maximal lactate steady state in trained cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31:742-746, 1999.
38. TOMSHI, J. F., and P. E. CRYER. Biphasic adrenergic modulation of beta receptors in man. *J. Clin. Invest.* 65:836-849, 1980.
39. WESSIGER, H. A., and G. J. BILL. The interactions of intensity, frequency, and duration of exercise training in altering cardiorespiratory fitness. *Sports Med.* 3:346-356, 1986.
40. WESTON, A. R., Z. MASHMO, and K. H. MYBURGH. Running economy of African and Caucasian distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32:1130-4, 2000.
41. XU, F., and E. C. RHOODES. Oxygen uptake kinetics during exercise. *Sports Med.* 27:313-327, 1999.

Estudio 2:

Impacto de la distribución del entrenamiento en el rendimiento en resistencia

(Impact of training distribution on endurance performance)

IMPACT OF TRAINING INTENSITY DISTRIBUTION ON PERFORMANCE IN ENDURANCE ATHLETES

JONATHAN ESTEVE-LANAO,¹ CARL FOSTER,² STEPHEN SEILER,³ AND ALEJANDRO LUCIA¹

¹Exercise Physiology Laboratory, European University of Madrid, Madrid, Spain; ²Department of Exercise and Sport Science, University of Wisconsin-La Crosse, La Crosse, Wisconsin 54601; ³Faculty of Health and Sport, Agder University College, Kristiansand, Norway

ABSTRACT. Esteve-Lanao, J., C. Foster, S. Seiler, and A. Lucia. Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes. *J. Strength Cond. Res.* 21(3):943–949, 2007.—The purpose of this study was to compare the effect of 2 training programs differing in the relative contribution of training volume, clearly below vs. within the lactate threshold/maximal lactate steady state region on performance in endurance runners. Twelve subelite endurance runners (who are specialists in track events, mostly the 5,000-m race usually held during spring-summer months and who also participate in cross-country races [9–12 km] during fall and winter months) were randomly assigned to a training program emphasizing low-intensity (subthreshold) (Z1) or moderately high-intensity (between thresholds) (Z2) training intensities. At the start of the study, the subjects performed a maximal exercise test to determine ventilatory (VT) and respiratory compensation thresholds (RCT), which allowed training to be controlled based on heart rate during each training session over a 5-month training period. Subjects performed a simulated 10.4-km cross-country race before and after the training period. Training was quantified based on the cumulative time spent in 3 intensity zones: zone 1 (low intensity; <VT), zone 2 (moderate intensity; between VT and RCT), and zone 3 (high intensity; >RCT). The contribution of total training time spent in zones 1 and 2 was controlled to have relatively more low-intensity training in Z1 (80.5 ± 1.8% and 11.8 ± 2.0%, respectively) than in Z2 (66.8 ± 1.1% and 24.7 ± 1.5%, respectively), whereas the contribution of high-intensity (zone 3) training was similar (8.3 ± 0.7% [Z1] and 8.5 ± 1.0% [Z2]). The magnitude of the improvement in running performance was significantly greater ($p = 0.03$) in Z1 (−15.7 ± 1.3 seconds) than in Z2 (−12.1 ± 7.1 seconds). These results provide experimental evidence supporting the value of a relatively large percentage of low-intensity training over a long period (~5 months), provided that the contribution of high-intensity training remains sufficient.

KEY WORDS. training zones, heart rate, running performance

INTRODUCTION

Although the underlying physiological adaptations associated with improved endurance performance with training are well established, debate abounds regarding how one should train to induce these adaptations and translate them to performance gains. A key issue of debate is the intensity of training and how the day-to-day training intensity should be distributed. Training intensity is typically broken into more or less arbitrary intensity zones, often based on readily accessible intensity measures, such as heart rate (HR) (i.e., 80–90% of maximal heart rate [HR_{max}]) (12). There is a clear practical need for dividing up the training intensity continuum into zones. However, these zones should be anchored in identifiable physiological markers if they are to be meaningful in interpreting the impact of training organization. Recently we (7, 27) adopted the use of ventilatory thresholds

and their associated HR values identified during progressive treadmill or bicycle testing to demarcate 3 training intensity zones. These include zone 1, low-intensity exercise performed below the first ventilatory threshold (VT); zone 2, moderately high-intensity exercise in an intensity range between the VT and the respiratory compensation threshold (RCT); and zone 3, high-intensity aerobic exercise performed above the RCT (7, 27).

Seiler and Kjerland (27) recently reported a 75%-8%-17% training session distribution in zones 1, 2, and 3, respectively, over a 32-day period in competitive junior cross-country skiers who were training 10 to 12 h·wk⁻¹. In a previous study (7), we found a similar (71%-21%-8%) distribution based on HR time-in-zone in distance runners during a ~6-month period where training volume was 4 to 5 h·wk⁻¹. These data are similar to those reported during training in professional cyclists (21), elite marathoners (2), elite rowers (8, 29), and cyclists performing 3-week tour races (20). The results of one of these descriptive studies (7) showed a positive association between the total training time in zone 1 and competition performance in a 10-km cross-country running race, tentatively suggesting that low-intensity training has a positive impact on performance despite a lack of intensity specificity. What these different studies from cyclists, runners, cross-country skiers, and rowers all share is the finding that well-trained (including world-elite) athletes perform ~75% of their training at intensities below the lactate threshold or VT (i.e., zone 1), despite competing at much higher intensities. They appear to require a relatively small percentage of their total training load at intensities at or above the VT (zone 2 or 3) to achieve top performance. In other words, it seems that substantial volumes of relatively low-intensity training (zone 1) may be a crucial part of competitive endurance training programs and may provide a platform for the specific adaptations that occur in response to the high-intensity or specific (zone 3) workouts. This hypothesis, however, is based on descriptive data alone because experimental studies involving manipulation of intensity distribution in well-trained athletes are nearly absent from the literature.

Accordingly, this study was designed to compare the performance effects of 2 training programs distinguished by different relative contributions of low-intensity zone 1 and lactate threshold zone 2 training intensity to the total training load while maintaining the high-intensity zone 3 contribution constant. Based on the findings of previous research showing that endurance athletes spontaneously organize their training to spend the majority of training time in zone 1 (7, 8, 10, 20, 23, 27), we hypothesized that the largest improvements in endurance performance would be elicited by a training program that emphasized relatively low-intensity (zone 1) training.

METHODS

Experimental Approach to the Problem

We subjected 2 groups of well-trained runners to a 5-month training program that differed only in the distribution of training intensity without a difference in total training load. Specifically, 1 group of athletes performed a relatively higher percentage of their total training volume in zone 1, below their VT. The second group trained relatively more in zone 2, between VT and RCT, while training less within zone 1. Both groups trained essentially identical volumes in zone 3 (i.e., intensities $\geq 90\%$ $\dot{V}O_{2\max}$). To ensure that total training loads (i.e., volume \times intensity) were similar in both study groups despite differences in intensity (lower or higher total contribution of zone 1), we used a modified approach to the training impulse (TRIMP) approach to monitoring training (9). To assess the impact of the 2 training programs, we compared competitive performance on a simulated 10.4-km cross-country race before and after the training period.

Subjects

The institutional research ethics committee (European University of Madrid) approved the study, and the subjects provided informed consent prior to participation. Twenty competitive subelite (regional to national level, competition experience ≥ 5 years) male Spanish runners were originally selected for this study. They participated in track events (mostly 5,000-m races) during the spring-summer months and in cross-country races (9–12 km) during fall-winter months. The subjects' personal records (PR) in a 10-km race ranged between 30 minutes, 30 seconds and 35 minutes 00 seconds.

All subjects lived and trained in the area around Madrid, Spain (~600-m altitude). Only the data of the subjects who met the following conditions were entered in our study: (a) completion of at least 98% of all the planned training sessions; (b) complete HR recordings of each training session (with no missing single session) over the total training period; (c) performing each daily training session under the supervision of one of the authors (J.E.-L.), who is a professional coach; (d) showing no signs or symptoms of overreaching/overtraining over the entire training period (i.e., prolonged increases in basal HR, inability to reach high HR values, inability to sustain the required running speed during very intense workouts, failure to recover from training sessions, decreased performance, significant muscle soreness even after easy days); and (e) performing both pre- and posttraining simulated competitions.

Prior to initiation of the training intervention period, the recruited runners all performed the same initial 3-week program of training with 100% zone 1 training in week 1 followed by 87/94 and 93/94 HR-based time-in-zone percentage distributions in weeks 2 and 3, respectively. Pretraining physiological testing was performed at the end of this baseline period. The twenty runners were then randomly assigned to 2 different training groups ($N = 10$ each) for a 5-month period, following a training program with increased contribution of zone 1 (group Z1) or decreased contribution of zone 1 and thus increased contribution of zone 2 (group Z2), relative to the normal training pattern observed in this population (7). Both groups had to perform the same total training load (volume \times intensity) over the training period, based on the TRIMP score method described below, but with different distribution of the 3 intensity zones. Seven subjects were

excluded because they failed to successfully record HR for at least 98% of their training sessions. One subject developed a chronic injury during the training period and was excluded. The results are therefore based on a comparison of the 6 subjects for each group who met all the inclusion criteria. Their mean age, body mass, and height at the start of the study was 27 ± 2 years, 63.5 ± 1.1 kg, and 174.8 ± 2.6 cm (Z1) and 27 ± 2 years, 65.4 ± 1.0 kg, and 174.3 ± 1.2 cm (Z2).

Procedures

Main Characteristics of Training and Periodization. The training plan of one of the groups (Z1) was designed to achieve a total percentage distribution in zones 1, 2, and 3 of ~80/10/10. The other group (Z2) followed a training plan designed to achieve a total percentage distribution in zones 1, 2, and 3 of ~65/25/10. The 2 training programs were designed to reach a similar score in the 2 groups for both: (a) total TRIMP accumulated from the 4th to the 21st week of the 5-month macrocycle (~8,900 TRIMPs) and (b) mean TRIMP accumulated in the same period (mean of ~495 TRIMPs \cdot wk $^{-1}$).

Daily training loads were based on time goals rather than distance, with the intent of controlling the relative time in each zone for each athlete. Apart from the 3-week baseline training period, the training load was adjusted every week to ensure achievement of similar TRIMP scores in both groups. Daily feedback from the athletes was also taken into account to avoid injuries or overreaching. All the athletes shared the same coach (J.E.-L.). The intensity of each subject's session was individualized based on normal coaching practice but constrained by the experimental treatment.

Overall, the main difference in training schedules was that subjects in Z2 typically performed several running bouts per week at a constant or "tempo" pace eliciting a HR in zone 2 (i.e., at a HR value equidistant to both VT and RCT), whereas for subjects in Z1 these sessions were performed in zone 1 (HR ~5 beats \cdot min $^{-1}$ below VT) over a longer duration. This allowed the 2 groups to achieve similar TRIMP scores. At the end of the training program (final 3-week mesocycle), intense sessions were performed at high intensities (i.e., achieving maximal HR values) by subjects of both groups. In both Z1 and Z2, the 5-month period of study (i.e., 21-week macrocycle) was divided in 2 initial 3-week mesocycles, followed by 3 4-week mesocycles and a final 3-week mesocycle. The initial 3-week mesocycle was identical for the 2 groups (i.e., identical distribution in intensity zones) because it included foundation, low-intensity running, and basic strength training sessions. In both groups, each 3-week mesocycle had a 2:1 load structure (i.e., 2 weeks of high load followed by an easy week), whereas the 4-week mesocycles followed a 3:1 load structure.

The training program was divided in 3 main periods, each with a different goal. The preparatory period (weeks 1–10) was used for foundation training (zone 1 and basic circuit weight training) followed by circuit weight training and short-to-long interval training (at ~RCT). In the specific period (weeks 11–18), strength training sessions were performed specifically during actual running (see below for more details on strength exercises). The competition period (weeks 19–21) included long intervals at a running speed above race pace, 1 easy session per week, and 1 weekly session of weight training (see below for more details on strength exercises).

Running distance averaged ~80 to 90 km \cdot wk $^{-1}$ in both

groups over the study period, increasing through the preparatory period to reach a maximum of $\sim 120 \text{ km}\cdot\text{wk}^{-1}$ in the 16th week and finally decreasing over the competition period (mean of $40\text{--}50 \text{ km}\cdot\text{wk}^{-1}$). Overall, running intensity followed the opposite pattern. Although considerable variations existed depending upon the period of the macrocycle and the hard or easy weeks of each mesocycle, the runners' usual training weekly program included 2 hard sessions $\cdot\text{wk}^{-1}$ (including interval or repetition workouts at high intensities) and 1 or 2 strength training sessions $\cdot\text{wk}^{-1}$. The remaining sessions were composed of continuous training (performed mainly in zone 1 for Z1 and zone 2 for Z2). During the specific and competition period, all the runners participated in 2 cross-country races of $\sim 5\text{-km}$ distance and 3 cross-country races of $\sim 10\text{-km}$ distance. Heart rate was continuously monitored during these preparatory races and included in the quantification of training loads. Although these competitions were not the target ones, they were used as an important part of the training schedule of these runners and the subjects in both groups were required to perform as well as possible.

Strength Training During the Study Period. All the subjects performed strength training exercises (see below) because this type of supplemental training has been shown to prevent the occurrence of injuries and to improve running economy (13, 25). Strength training was identical for all subjects and was not related to the experimental manipulation of the training program. During the initial 3-week mesocycle, the runners performed isometric and dynamic, body mass-wearing exercises (with no external load), exercises (30- to 60-s duration) at different joint angles, and aerobic circuit weight training with light loads. Subjects also performed 8 to 10 different types of weight lifting exercises (2-4 sets corresponding to 15-25 RM of half squat in multipower, lunge, leg curl, leg press, bench press, calf raises, and lateral pull) and other local exercises with elastic bands, such as skipping and mat and Swiss ball core exercises, as well as foot, ankle, and knee proprioceptive exercises.

During the preparatory period (up to the 10th week), weight and resistance training exercises were mostly 1-leg half squat, clean, snatch, eccentric hamstring exercises; eccentric-concentric calf exercises (to strengthen Achilles tendon and prevent injuries in this zone); and ankle-loaded skipping exercises. Loads varied from 10 to 20 RM with a 1/3-second ratio between concentric/eccentric phase to more explosive exercises (3-8 repetitions with 15-25 RM loads) at fast stretch-shortening cycle. Light-intensity plyometric training was also performed. Finally, subjects performed some specific routine exercises, such as the Oregon circuit training over $10 \times 50\text{-m}$ to 100-m running bouts interspersed with 9 explosive exercises of 10 repetitions each with light loads (clean, snatch, squats) or without load (skipping, jumps).

In the specific period (weeks 11-18), strength training sessions were performed specifically during actual running (using weighted vests, short running intervals on steep hills, or longer repetitions on muddy terrain) at specific competition speeds or above them.

During the competition period (weeks 19-21), subjects performed 1 single weight-training session per week consisting of basic exercises (i.e., 1-2 sets each of half squat, leg curl, and curl raise), with loads corresponding to 60% of estimated 1RM at a moderate speed (ratio concentric/eccentric: 1 s/1 s) and avoiding reaching failure (i.e., stopping each exercise 2-3 repetitions before muscle failure).

The goal of this single weekly session was to maintain strength levels without inducing further muscle damage during this demanding phase that included intense running sessions.

Baseline Laboratory Testing and Performance Test. Subjects reported to the laboratory ($\sim 600\text{-m}$ altitude) at the beginning of the training period to perform a physiological (ramp) test on a treadmill (Technogym Run Race 1400 HC, Gambettola, Italy) for VT and RCT determination. After a general warm-up, starting at $11 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, running velocity was increased by $0.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ every 30 seconds until volitional exhaustion. During the tests, gas exchange data were collected continuously using an automated breath-by-breath system ($\dot{V}_{\text{max}} 29\text{C}$; Sensor-medics, Yorba Linda, CA). The following variables were measured: oxygen uptake (\dot{V}_{O_2}), pulmonary ventilation (VE), ventilatory equivalents for oxygen ($\text{VE}\cdot\dot{V}_{\text{O}_2}^{-1}$) and carbon dioxide ($\text{VE}\cdot\text{CO}_2^{-1}$), and end-tidal partial pressure of oxygen ($P_{\text{ET}}\text{O}_2$) and carbon dioxide ($P_{\text{ET}}\text{CO}_2$).

Maximal oxygen uptake ($\dot{V}_{\text{O}_2\text{max}}$) was recorded as the highest \dot{V}_{O_2} value obtained for any continuous 1-minute period during the tests. At least 2 of the following criteria were also required for the attainment of $\dot{V}_{\text{O}_2\text{max}}$: a plateau in \dot{V}_{O_2} values despite increasing velocity, a respiratory exchange ratio ≥ 1.15 , or the attainment of a peak HR value above 95% of the age-predicted maximum (6). The VT was determined using the criteria of an increase in both $\text{VE}\cdot\dot{V}_{\text{O}_2}^{-1}$ and $P_{\text{ET}}\text{O}_2$ with no increase in $\text{VE}\cdot\text{CO}_2^{-1}$, whereas the RCT was determined using the criteria of an increase in both $\text{VE}\cdot\dot{V}_{\text{O}_2}^{-1}$ and $\text{VE}\cdot\text{CO}_2^{-1}$ and a decrease in $P_{\text{ET}}\text{CO}_2$ (7). Two independent observers detected VT and RCT. If there was disagreement, the opinion of a third investigator was obtained (7). Heart rate ($\text{beats}\cdot\text{min}^{-1}$) was continuously monitored during the tests using radio telemetry (Accurex Plus, Polar Electro OY, Finland).

At the beginning and at the end of the training period, each subject performed a time trial, which constituted the simulated competition test (10.4-km cross-country race) on the same loop and under similar wind and environmental conditions. This time trial was used to (a) determine initial fitness level and ensure similar fitness levels in both groups before the start of the study (given that subjects were randomly assigned to either Z1 or Z2 group) and (b) compare the magnitude of changes in performance in both groups over the training period. The cross-country loop was similar to that of the target competition at the end of the season, and subjects were instructed to perform maximally. Verbal encouragement was given to the subjects, and all the tests were preceded by the typical pre-competitive rest period (i.e., 2-3 days of easy training) to simulate actual competition conditions. Subjects wore a HR telemeter during pre- and post-training simulated competitions in order to compare the exercise intensity of both races.

Quantification of Exercise Load in Training. Because the initial 3-week mesocycle was the same for the 2 groups, for statistical comparisons we quantified data from the 4th to the 21st week (18 experimental weeks). For all the subjects, HR was measured (every 5 seconds) during each training session and preparatory competition (with no missing data) over the entire 21-week macrocycle. The following variables were quantified: (a) total time spent in each intensity zone (zone 1: HR below the HR at VT; zone 2: HR between HR at VT and HR at RCT; zone 3: HR above HR at RCT) and (b) total load (TRIMP score) as explained below. A total of $\sim 2,000$ training sessions

were analyzed. Previous research on trained endurance athletes has shown that HR values at VT and RCT determined during laboratory testing remain stable over the season despite significant improvements in the workload eliciting both thresholds (22). Thus, a single test performed early during the training period (as used here) appears valid for training monitoring based solely on target HR values at VT and RCT (23).

We estimated total exercise load (i.e., intensity \times volume) accumulated in each training session using a novel approach to calculating the TRIMP based on a method recently developed by Foster et al. (9). This method, which has been recently used to estimate total exercise load in 3-week professional cycling races (10, 23) and the training sessions of well-trained endurance runners of similar competition level to that of the present subjects (7), uses HR data during exercise to integrate both total volume and total intensity relative to 3 intensity zones. Briefly, the score for each zone is computed by multiplying the accumulated duration in this zone by an intensity-weighted multiplier (e.g., 1 minute in zone 1 is given a score of 1 TRIMP, 1 minute in zone 2 is given a score of 2 TRIMPs, and 1 minute in zone 3 is given a score of 3 TRIMPs). The total TRIMP score is then obtained by summing the results of the 3 zones.

Statistical Analyses

To ensure that the fitness and competition level of both groups was similar at baseline, mean values of all the variables indicative of fitness levels ($\dot{V}O_{2\max}$, VT and RCT, etc.) and performance (10.4-km simulated race) obtained before the training period were compared between groups using the Mann-Whitney *U*-test. (Given the small population size, we selected the aforementioned nonparametric test instead of using an unpaired Student's *t*-test). We used a Wilcoxon test and Pearson's correlation coefficients to compare the intensity (through HR data) in all the subjects during both simulated competitions. This allowed us to confirm that the subjects performed a similar effort in both competitions, and thus the possible difference in the magnitude of improvement from pre- to post-training between both groups was attributable to the training intervention. To ensure that the total training loads (volume \times intensity) and distribution in intensity zones was similar and different, respectively, in the 2 groups during the training period, mean values of total TRIMP score and total and % time spent in zones 1, 2, and 3 over the 18-week intervention period (weeks 4–21) were also compared in the 2 groups with the Mann-Whitney *U*-test. Finally, to evaluate the interactive effect of group and time on performance, mean improvement in performance over the training period in both Z1 and Z2 was compared using the Mann-Whitney *U*-test. The size of the change in performance and its precision were provided by reporting the change in mean values (\pm SEM) and the 95% confidence intervals (95% CI) for the change, respectively. The statistical power for all comparisons between groups Z1 ($N = 6$) and Z2 ($N = 6$) ranged between 0.06 and 1.00.

Descriptive data are reported as mean \pm SEM, and the level of significance was set at $p \leq 0.05$ for all statistical analyses.

RESULTS

Baseline Laboratory and Performance Tests

The average values of maximal running velocity attained during the treadmill tests (v_{\max}), $\dot{V}O_{2\max}$, running ve-

TABLE 1. Results (mean \pm SEM) of laboratory and simulated competition tests at baseline (i.e., before the 18-week intervention period).*

	Group Z1 ($n = 6$)	Group Z2 ($n = 6$)
v_{\max} (km·h ⁻¹)	21.5 \pm 0.6	21.2 \pm 0.7
$v\dot{V}O_{2\max}$ (km·h ⁻¹)	21.1 \pm 0.7	20.5 \pm 0.6
$\dot{V}O_{2\max}$ (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	68.6 \pm 2.4	70.3 \pm 2.6
HR _{max} (b·min ⁻¹)	191 \pm 4	193 \pm 3
VT (km·h ⁻¹)	13.7 \pm 0.6	13.8 \pm 0.5
VT (% $\dot{V}O_{2\max}$)	67.0 \pm 2.6	68.0 \pm 3.6
VT (beats·min ⁻¹)	147 \pm 4	151 \pm 4
RCT (km·h ⁻¹)	17.8 \pm 0.6	17.8 \pm 0.6
RCT (% $\dot{V}O_{2\max}$)	88.0 \pm 2.3	87.3 \pm 1.9
RCT (beats·min ⁻¹)	171 \pm 4	173 \pm 3
Performance time during 10.4-km simulated cross-country race (s)	2249 \pm 51	2271 \pm 61

* No significant differences existed between groups for any of the variables ($p > 0.05$). v_{\max} = maximal running velocity attained during the treadmill tests; $v\dot{V}O_{2\max}$ = running velocity at $\dot{V}O_{2\max}$; HR_{max} = maximal heart rate; VT = ventilatory threshold; RCT = respiratory compensation threshold.

TABLE 2. Comparison of exercise intensity in the pre- and post-training simulated competitions in all the subjects ($N = 12$).*

	Pre-training ($n = 12$)	Post-training ($n = 12$)
Mean HR (b·min ⁻¹)	175 \pm 9	178 \pm 9
Mean HR (%HR _{max})	91.1 \pm 2	92.5 \pm 2
HR _{peak} (beats·min ⁻¹)	185 \pm 12	186 \pm 11

* Results are expressed as mean \pm SEM. No significant differences existed between means ($p > 0.05$). HR = heart rate; HR_{max} = HR_{max} value of the laboratory tests (Table 1); HR_{peak} = peak HR value obtained during each simulated competition.

locity at $\dot{V}O_{2\max}$ ($v\dot{V}O_{2\max}$), HR_{max}, VT, RCT (both expressed as either running speed, %HR_{max}, or % $\dot{V}O_{2\max}$), and performance time in the baseline competition test did not differ between the 2 groups (Table 1).

On the other hand, no significant difference was found between the exercise intensity (expressed as mean HR (beats·min⁻¹), mean HR (expressed as %HR_{max}), and peak HR attained during competition) of the pre- and post-training simulated competition, respectively (Table 2). Correlation coefficients between both competitions for the aforementioned variables were high and significant: $R = 0.86$ ($p < 0.001$) for mean HR (beats·min⁻¹), $R = 0.87$ ($p < 0.001$) for mean HR expressed as %HR_{max}, and $R = 0.82$ ($p < 0.05$) for peak HR obtained during competition.

Quantification of Training Load

None of the 12 subjects who completed the study became injured or sick during the training period or showed signs of chronic fatigue/overtraining (e.g., decreased peak values of HR, chronic muscle soreness). All were able to complete virtually ~100% of training sessions over the 5-month program as originally planned. The cumulative total duration of training sessions over the experimental period (weeks 4–21) averaged ~95–110 hours per runner (~100 hours in Z1 vs. ~75 hours in Z2) or ~5 to 6 hr·wk⁻¹. When expressed in total running distance, subjects completed a total of ~1,500 km (~85 km·wk⁻¹).

TABLE 3. Results (mean \pm SEM) of training loads over the 18-week intervention period.

	Group Z1 (n = 6) goal distribution in zones 1, 2, and 3: -80/10/10	Group Z2 (n = 6) goal distribution in zones 1, 2, and 3: -65/25/10
Total TRIMPs	8134 \pm 408	8277 \pm 463
Mean TRIMP-wk ⁻¹	452 \pm 23	460 \pm 26
Total time in zone 1 (min)	5246 \pm 396	3830 \pm 215*
Total time in zone 2 (min)	779 \pm 116	1411 \pm 95*
Total time in zone 3 (min)	502 \pm 78	485 \pm 65
Total % in zone 1	80.5 \pm 1.8	65.8 \pm 1.1
Total % in zone 2	11.8 \pm 2.0	24.7 \pm 1.5*
Total % in zone 3	8.3 \pm 0.7	8.5 \pm 1.0*

* $p < 0.01$ for Z1 vs. Z2. See text for explanation of TRIMP and zones 1, 2, and 3.

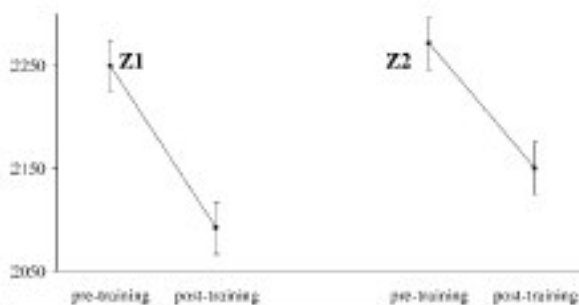


FIGURE 1. Change in performance after the training period during the simulated 10.4-km cross-country race in both groups.

As designed, no significant differences were found in total TRIMP score or in mean weekly TRIMP score between groups, indicating that the total training load (intensity \times volume) of both groups was similar over the intervention period (Table 3). However, as designed, significant differences were found between groups for total and percent training time in zones 1 and 2 ($p < 0.01$), but no significant differences were found for total and percent training time in zone 3 ($p > 0.05$).

Although performance time was significantly improved in both groups after training ($p = 0.03$ in both cases) (Figure 1), the magnitude of the improvement was significantly ($p = 0.03$; statistical power = 0.60) higher in Z1 than in Z2 (-157 ± 13 seconds vs. -121.5 ± 7.1 seconds, respectively; difference in mean improvement between Z1 and Z2: -35.5 ± 14.6 seconds; 95% CI: -68.4 seconds; -3.3 seconds).

DISCUSSION

The key finding of this study was that in a well-trained athletes training over a 5-month period, a distribution of HR-based training intensity of 80% zone 1, 12% zone 2, and 8% zone 3 elicited significantly greater performance enhancement than a program in which the time spent at or around the lactate threshold intensity was doubled to ~25% while holding time in zone 3 constant.

This is the first randomized, controlled training study that has experimentally assessed, through quantification of actual training loads, the effects of increasing or decreasing the contribution of relatively low intensity (zone 1) training on the performance of well-trained endurance athletes. To the best of our knowledge, only 2 recent de-

scriptive studies have continuously monitored actual daily training loads using objective methods (HR recordings) during short- (32 days) (27) to long-duration (6 months) training periods in competitive endurance athletes (7). Although our results do not necessarily challenge the classic principle of training specificity, our data, together with those of previous research (2, 7, 20, 21, 23, 26), support the notion that in well-trained athletes, only a comparatively small amount of training needs to be performed at moderate to high intensities (zones 2 and 3) in order to achieve top performance and prevent overtraining. In other words, it seems that relatively low-intensity training (zone 1) is an essential part of any competitive endurance training program.

For the reader familiar with the substantial literature involving the training of untrained subjects at intensities approximating their lactate threshold, the now robust observation (2, 7, 8, 22, 26-28) that successful endurance athletes spend comparatively little training time in zone 2 may seem surprising. Previously, one of us synthesized these observations by proposing that elite endurance athletes tend to self-organize their training in a polarized fashion, with most of their training performed clearly below or above the zone 2 intensity range but relatively little training in this middle zone (8, 27). One point of discussion that remains uncertain is how best to quantify training intensity distribution. In the present study, we have used the HR-based time in zone approach. This approach registers all HRs from the start to the finish of every training session without taking into account the nature of the training sessions performed. The strength of this approach is that every training minute is incorporated into the quantification. A weakness of this approach may be that the impact of high-intensity sessions, such as interval training on the distribution of daily stress load, is diluted by the considerable zone 1 and 2 HR contribution to even a very hard high-intensity interval session (warm-up, recovery between intervals, cool down). In response to this problem, another quantification approach that focuses more on the predominant intensity of each training session or session goal approach has also been described (27). When applied to the current study, we found that in the Z1 group 74% of all sessions were performed in zone 1, 11% were performed primarily in zone 2, and 15% of all sessions involved interval training or training races in zone 3. This distribution approximates the polarized intensity distribution observed previously (2, 27, 29) in highly trained athletes during a hard preparation period.

The current study adds significantly to these previous descriptive reports by subjecting the hypothesis that a focus on low-intensity volume is actually important in maximizing performance gains to an experimental trial. The tight control of total volume and training load in the present study allows us to conclude that the distribution of training load across intensity and not only total training load or average intensity of training is a critical factor in optimizing performance gains.

In the competition model chosen here (simulated 10-km cross-country race), the contribution of zone 3 (i.e., $\geq 90\%$ of HR_{max}) is predominant ($\geq 85\%$ of total competition time). Despite this fact, low-intensity training accounts for the great majority of training time. In pilot studies with the same subjects, we originally aimed to assess the effects of increasing the contribution of zone 3 training, i.e., accounting for up to 15% of total time in zone (i.e., significant volumes of zone 3 training incorpo-

rated into ~25–30% of all training sessions). This training model was found to be too demanding for the subjects to be followed for more than 2 to 3 weeks. Afterwards, signs of overreaching/overtraining (altered sleeping patterns, insufficient recovery between daily workouts, increased muscle soreness or inability to reach zone 3, and target running pace during intense workouts) were evident in most of the runners. Similarly, the relative contribution of zone 3 during highly demanding endurance events, such as the Tour de France, does not surpass 10% of exercise time (20). On the other hand, although moderate-intensity training (~55–85% HR_{max}) for 20 to 60 minutes (at least 3 days·wk⁻¹) is usually recommended for improving and maintaining cardiorespiratory fitness in nonathletes (1), the upper part of this general intensity zone (i.e., zone 2, corresponding to ~70–90% HR_{max} in our subjects) seems too demanding for endurance athletes (i.e., with a mean weekly training time ≥6 hours). When a certain threshold is reached (>20% of total training time), this intensity zone does not seem to induce further beneficial adaptations as opposed to increasing time in zone 1.

Seiler and Kjerland (27) have proposed that there are 2 basic patterns of training intensity distribution emerging from the research literature. They called one of them the "threshold-training" model, in which a special emphasis is placed on training sessions at intensities around the maximal lactate steady state i.e., ~zone 2. This model has been shown to induce significant improvements in untrained subjects (5, 11, 14, 18). The other pattern proposed by Seiler and Kjerland is the so-called "polarized-training" model. This pattern emerges from a limited number of published observations in elite endurance athletes, including international class rowers (8, 28, 29), cross-country skiers (27), gold medal-winning time trial cyclists (26), and internationally elite marathoners (2). Although differing in sport discipline, all of these studies involved athletes training ≥10 to 12 hours per week. They suggest that high-performance athletes generally train either in zone 1 (accounting for ~75% of the total training volume) or above the RCT (~10% of HR based time in zone or perhaps 15% of training sessions) but surprisingly little time at threshold intensity (zone 2). For example, Billat and colleagues (2) reported that elite French and Portuguese marathoners (best times of 2:06–2:10) only performed 4% of their training kilometers at marathon pace, which is essentially identical with the first lactate threshold.

Thus, the threshold-training model (mainly focused in zone 2) seems more adequate for untrained or moderately fit populations, whereas in endurance athletes, spending too much training time in zone 2 (>20%) at the expense of zone 1 may impair competitive performance, perhaps through its impact on the autonomic nervous system. Our experimental data support the hypothesis that a polarized-training model may be optimal in competitive athletes, provided the contribution of zone 3 approximates 10% of total training time (or 15% of total training sessions i.e. 1 to 2 zone 3 sessions per week) during mid- to long-term training periods (>1 month).

Studies from both Australia (15) and South Africa (30) in high-level cyclists have demonstrated that training performance responds positively to short-term increases in the amount of high-intensity training performed. Common to both of these studies was the fact that at baseline the subjects were performing very little zone 2 or 3 and were presumably therefore quite responsive to a short-

term increase in intensity loading. These same studies do not support a clear advantage of one type of intensified training over another, suggesting that the impact of intensified training may be quite general, mirroring earlier findings from Daniels et al. (4), who demonstrated a very general response to intensified training. The implication of these findings is that adaptations to high-intensity training occur quite rapidly and that the dose-response characteristics of high-intensity training may saturate at fairly low volumes of training. It seems reasonable to hypothesize that central circulatory performance might respond (and saturate) rapidly to increases in training intensity, whereas changes in skeletal muscle mitochondrial volume, capillary density, and other skeletal muscle adaptations may take weeks or months to saturate (24). Thus, from the perspective of adaptation induction, substantial volumes of low-intensity training coupled with small volumes of high-intensity training may provide an effective combination of stimuli for both peripheral and central adaptation. It is important to point out here that low-intensity exercise for the well-trained athlete is directly comparable to low-intensity exercise for the untrained to moderately active. Intensity is quantified relative to the maximal oxygen consumption, which is in turn limited by cardiovascular performance. Therefore, in well-trained athletes with typically high maximal oxygen consumption, a given relative intensity corresponds to a greater degree of muscle activation and oxidative flux in working muscle. We suspect that this difference is of importance in understanding the way training intensity self-organizes towards a polarized model in highly trained endurance athletes.

Training induces adaptation but also induces stress responses. Controlling the training intensity distribution may provide a mechanism for balancing these 2 effects. An alternative explanation for the comparatively small amount of moderate-to-high intensity (zones 2–3) training performed by serious athletes has to do with the likelihood of down-regulation of the sympathetic nervous system in response to a large volume of high-intensity exercise. There is evidence that the activity of the sympathetic nervous system is reduced after severe and prolonged training and competition in athletes, consistent with a hormonal exhaustion syndrome (19). Lehmann et al. (16) reported decreases in catecholamine secretion in overtrained athletes. Although beta receptor density and catecholamine sensitivity are generally higher in athletes than sedentary individuals (17), heavy training produces evidence of catecholamine depletion (16). This pattern may also be consistent with a reduced sensitivity to catecholamines, as demonstrated in chronic over-stimulation or exhaustive stress (3, 31). Because one consequence of a reduced sensitivity to catecholamines might be reductions in maximal cardiac output and the ability to selectively divert blood flow to the active musculature and because down-regulation of beta receptors would only be expected in the presence of chronic elevations of catecholamines, it is possible that there is an upper limit to the amount of high-intensity training that can be tolerated over any period. Evidence supporting this concept may be found in the fixed TRIMP values and minutes of zone 3 exercise in the relatively longer Tour de France cycling race and the relatively shorter Vuelta a España (10, 23). As previously mentioned, pilot research from our group with these same runners has shown very poor tolerance to a training program with a contribution of zone 3 exceeding 10% of total training time.

PRACTICAL APPLICATIONS

In summary, we observed that an intensification of training to include significantly more training at and around the lactate threshold was actually associated with relatively smaller performance gains over a 5-month training period compared with a group of athletes whose training organization was more focused on low-intensity zone 1 training volume coupled with moderate volumes (~10%) of zone 3 training.

Our results do not necessarily challenge the classic principle of training specificity, and it should be kept in mind that the present data provide no evidence that highly specific workouts (zone 3) simulating competition speed are not crucial to achieve top-level performance. Rather, our data suggest that an older coaching concept of "junk miles" applies not to relatively low-intensity training but to moderately high-intensity training. Large volumes of zone 2 or threshold training in already well-trained athletes may be inadequate to stimulate further cardiorespiratory adaptation but may contribute to fatigue, potentially via down-regulation of the sympathetic nervous system.

One of the main training questions for coaches and athletes involved in medium-to-long distance running events is whether it is better to train moderately faster for a shorter time or to train longer at light intensities. The main finding of this study is that if experienced runners accumulate more time at moderately high intensities (zone 2), they do not necessarily develop a faster racing pace. The present data suggest that if the runner can dedicate more time to daily training sessions, it seems better to design an "easy-hard" distribution of load (increasing the amount of low-intensity training) than a "moderately high-hard" training approach (large zone 2 contribution).

These findings add the first direct experimental support of several descriptive studies reporting a polarized training organization among elite endurance athletes. For the conditioning coach, a take-home message may be that sport training sessions should also attempt to avoid making every session the same intensity to avoid stagnation and staleness. Longer training sessions at more moderate intensity should be balanced against highly demanding training bouts, either on the field or in the weight room. Both intensity levels in proper combination seem to be important for long-term development, although the proper combination seems to include relatively more low-intensity, nonspecific training than might have been anticipated.

REFERENCES

1. AMERICAN COLLEGE OF SPORTS MEDICINE. Position stand on the recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30:978-991. 1998.
2. BILLAT, V.L., A. DEMARLE, J. SLAWINSKI, M. PAIVA, AND J.P. KORALETTEN. Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33:2069-2077. 2001.
3. BRECKE, O.E., A. DAUL, AND N. O'HARA. Beta adrenoceptor changes in human lymphocytes induced by dynamic exercise. *Naunyn-Schmiedeberg Arch. Pharmacol.* 328:190-192. 1984.
4. DANIELS, J.T., R.A. YARBROUGH, AND C. FOSTER. Changes in $\dot{V}O_{2max}$ and running performance with training. *Eur. J. Appl. Physiol.* 39:249-254. 1978.
5. DENNIS, C., D. DORMICO, AND J.H. LACOUR. Endurance training, $\dot{V}O_{2max}$, and OELA: A longitudinal study of two different age groups. *Int. J. Sports Med.* 5:167-173. 1984.
6. DOHERTY, M., L. NOERS, AND T.D. NOAKER. Low frequency of the "plateau phenomenon" during maximal exercises in elite British athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* 89:619-623. 2003.
7. ESTEVE-LANAJO, J., A.F. SAN JUAN, C.P. EARNETT, C. FOSTER, AND A. LUCIA. How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 37:496-504. 2005.
8. FISKESTRAND, A., AND K.S. SEILER. Training and performance characteristics among Norwegian international elite rowers 1970-2001. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 14:308-310. 2004.
9. FOSTER, C., J.A. FLOREANO, J. FRANKLIN, L. GOTTSCHALL, L.A. HROVATIN, S. PARKER, P. DOLESIAL, AND C. DODGE. A new approach to monitoring exercise training. *J. Strength Cond. Res.* 15:109-118. 2001.
10. FOSTER, C., J. HOYOS, C.P. EARNETT, AND A. LUCIA. Regulation of energy expenditure during prolonged athletic competition. *Med. Sci. Sports Exerc.* 37:670-678. 2005.
11. GASHILL, S.E., A.J. WALKER, R.A. SERPASE, C. BUCHARD, J. GAGNON, D.C. RAO, J.S. SHINER, J.H. WILMOR, AND A.S. LEON. Changes in ventilatory threshold with exercise training in a sedentary population: The HERITAGE Family Study. *Int. J. Sports Med.* 22:386-392. 2001.
12. GILMAN, M.B. The use of heart rate to monitor the intensity of endurance training. *Sports Med.* 21:75-79. 1996.
13. JUNO, A.P. The impact of resistance training on distance running performance. *Sports Med.* 33:539-552. 2003.
14. KINDERMANN, W., G. SIMON, AND J. KEUL. The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 42:25-34. 1979.
15. LAURSEN, P.B., C.M. SHING, J.M. PRAKE, J.S. COOMBS, AND D.G. JENKINS. Interval training program optimization in highly trained endurance cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34:1801-1807. 2002.
16. LEHMANN, M., P. BAUMGARTL, C. WIRTSACK, A. SEIDL, H. BAUMANN, S. FISCHER, U. SPORL, G. GENDREICH, R. KAMINSKI, AND J. KEUL. Training-overtraining: Influence of a defined increase in training volume vs training intensity on performance, catecholamine and some metabolic parameters in experienced middle and long-distance runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 84:169-177. 1992.
17. LEHMANN, M., H.H. DICKHUTH, P. SCHMID, H. PORZIG, AND J. KEUL. Plasma catecholamines, beta adrenergic receptors, and isoproterenol sensitivity in endurance trained and non-endurance trained volunteers. *Eur. J. Appl. Physiol.* 82:362-369. 1984.
18. LONDREHE, B.R. Effect of training on lactate/ventilatory thresholds: A meta-analysis. *Med. Sci. Sports Exerc.* 29:837-843. 1997.
19. LUCIA, A., B. DIAZ, J. HOYOS, C. FERNANDEZ, G. VILLA, F. BANDRES, AND J.L. CECHARRRO. Hormone levels of world class cyclists during the Tour of Spain stage race. *Br. J. Sports Med.* 38:424-430. 2001.
20. LUCIA, A., J. HOYOS, A. CARVAJAL, AND J.L. CECHARRRO. Heart rate response to professional road cycling: The Tour de France. *Int. J. Sports Med.* 20:167-172. 1999.
21. LUCIA, A., J. HOYOS, J. PAREDO, AND J.L. CECHARRRO. Metabolic and neuromuscular adaptations to endurance training in professional cyclists: A longitudinal study. *Jpn. J. Physiol.* 50:381-388. 2000.
22. LUCIA, A., J. HOYOS, M. PEREZ, AND J.L. CECHARRRO. Heart rate and performance parameters in elite cyclists: A longitudinal study. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32:1777-1782. 2000.
23. LUCIA, A., J. HOYOS, A. SANTALLA, C. EARNETT, AND J.L. CECHARRRO. Tour de France vs Vuelta a España: Which is harder? *Med. Sci. Sports Exerc.* 38:872-878. 2006.
24. SALTIN, B., AND P.D. GOLLNICK. Skeletal muscle adaptability: Significance for metabolism and performance. In: *Handbook of Physiology*, L.D. Peachey, ed. Baltimore: Williams and Wilkins, 1983, pp. 555-631.
25. SAUNDERS, P.U., D.B. PYLE, R.D. TELFORD, AND J.A. HAWLEY. Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med.* 34:468-488. 2004.
26. SCHUMACHER, Y.O., AND P. MUELLER. The 4000-m team pursuit cycling world record: Theoretical and practical aspects. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34:1029-1038. 2002.
27. SEILER, K.S., AND G.O. KJERLAND. Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: Is there evidence for an 'optimal' distribution? *Scand. J. Med. Sci. Sports* 16:49-56. 2006.
28. STEINACKER, J.M. Physiological aspects of training in rowing. *Int. J. Sports Med.* 14(Suppl 1):S3-S10. 1993.
29. STEINACKER, J.M., W. LORRMES, M. LEHMANN, AND D. ALTENBURG. Training of rowers before world championships. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30:1188-1193. 1998.
30. STEPTO, N.K., J.A. HAWLEY, S. C. DENNIS, AND W.G. HOPE. Effects of different interval training programs on cycling time-trial performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31:716-741. 1998.
31. TONKIN, J.F., AND P.E. CHYER. Biphasic adrenergic modulation of beta receptors in man. *J. Clin. Invest.* 63:516-549. 1979.

Address correspondence to Jonathan Esteve-Lanao, jonathan.esteve@ucm.es.

Estudio 3:

El entrenamiento periodizado de la fuerza atenúa la pérdida de longitud de zancada en
corredores de fondo

(Periodized strength training attenuates loss of stride length in endurance runners)

Title: Running specific, periodized strength training attenuates loss of stride length during intense endurance running.

Brief running head: Strength training and stride length

Authors: Jonathan Esteve-Lanao¹, Matthew R. Rhea², Steven J. Fleck³, Alejandro Lucia¹

¹ European University of Madrid, Madrid, SPAIN

² Department of Interdisciplinary Health Sciences, AT Still University, Mesa, Arizona, USA

³ Sport Science Department, Colorado College, Colorado Springs, CO, USA

Address for correspondence:

Jonathan Esteve-Lanao.

European University of Madrid.

28670 Madrid, Spain.

Fax number: 34 91 616 82 65.

E-mail: jonathan.esteve@uem.es

ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the effects of a running specific, periodized strength training program (performed over the specific period (8-week duration) of a 16-week macrocycle) on endurance-trained runners' capacity to maintain stride length during running bouts at competitive speeds. Eighteen well-trained middle-distance runners completed the study (personal bests for 1500 and 5000 m of 3 min 57 s ± 12 s and 15 min 24 s ± 36 s). They were randomly assigned to each of the following groups (N = 6/group): *periodized strength* group, performing a periodized strength training program over the 8-week specific (intervention) period (2 sessions·week⁻¹); *non-periodized strength* group, performing the same strength training exercises as the periodized group over the specific period but with no week-to-week variations; and a *control* group, performing no strength training at all during the specific period. The % loss in the stride length (cm) / speed (m·s⁻¹) (SLS) ratio was measured by comparing the mean SLS during the 1st and 3rd (last) group of the total repetitions, respectively, included in each of the interval training sessions performed at race speeds during the competition period which followed the specific period. Significant differences (P<0.05) were found in mean % of SLS loss between the three study groups, with the *periodized strength* group showing no significant SLS change (0.36 ± 0.95%) and the two other groups showing a moderate or high SLS loss (-1.22 ± 1.5% and -3.05 ± 1.2% for the *non-periodized strength* and *control* groups, respectively). In conclusion, periodized, running specific strength training minimizes the loss of stride length that typically occurs in endurance runners during fatiguing running bouts.

Keywords: Distance running, cardiovascular fitness, performance enhancement

INTRODUCTION

It has previously been shown that periodized strength training programs are overall more effective than non-periodized training programs for increasing maximal strength (7, 26, 27). In recent years growing interest has focused on evaluating different types of strength training periodization programs. However, little research has focused on analysing the effects of periodized strength training on the performance of trained endurance athletes (28).

Traditionally the main determinants of endurance performance have been believed to be maximal oxygen uptake ($VO_2\text{max}$), lactate threshold and muscle efficiency. Recent research also places a growing emphasis on anaerobic capacity/power (2, 4, 10, 11, 15, 19, 24). A decrease in power production could impact endurance running performance by reducing stride length.

Besides its role in important aspects of basic preparatory training, such as injury prevention or athlete preparation for the upcoming more intense training, strength training can have a beneficial effect on endurance performance, especially through an increase in the running economy of trained runners (14, 23, 29, 32). The latter is attributable to improvements in neuromuscular characteristics, including motor unit recruitment and reduced ground contact time (16). Improvements in running economy can be achieved through *maximal* (14) or *power* strength training (23, 29, 32). Field studies have used a 'high-load, low repetition' model of weight training and/or plyometrics. However, in cross-country skiers (20) and swimmers (17, 33, 35), *sport specific* strength training exercises (e.g., rollerboard training for cross-country skiers or specific strength training devices used in the water for swimmers) seem to elicit greater gains in performance than 'conventional' weight training programs. Indicating sport specific strength training programs may elicit performance gains in runners.

In middle and long-distance running events, increases in speed are produced by a linear increase in stride length. This is the result of applying more force during foot contact rather than increasing stride frequency (18, 30, 37). Previous investigations have identified kinematic changes indicating changes in running technique with fatigue (9, 12), including decreases in stride length (7, 31). Additionally, runners who are capable of keeping consistent running mechanics (i.e., with the lowest decrease in stride length) are those who are able to sustain competition speeds for longer time periods (9). To our knowledge, no study has been published examining the effect of a periodized, *sport specific* strength training program on the stride length of competitive runners during intense running bouts.

It was therefore the purpose of this study to determine the effects of a *sport specific*, periodized strength training program on endurance-trained runners' capacity to maintain stride length during interval training sessions performed at competition speeds. Given that strength training is known to improve muscle power and thus possibly runners' ability to maintain a constant kinematic style, the addition of a specific, periodized strength training program to a conventional endurance running program would theoretically enable runners to maintain stride length during fatiguing interval training sessions better than a training program including no strength training at all. Additionally, we also hypothesized that a periodized strength training program (that is, structured with specificity criteria, i.e., from higher to lower resistance and from general to specific exercises) would induce greater benefits (e.g. less decrease in stride length) than a non-periodized strength training program.

METHODS

Experimental approach to the Problem

The main characteristics of the study design are shown in Figure 1. Our study took place over a 16-week macrocycle [i.e., the spring season following the winter (cross-country) season] that was composed of a 4-week *preparatory period* followed by an 8-week *specific period* and a final 4-week *competition period*. Our strength training intervention (see below) took place during the specific period only. The preparatory and competition training periods were thus identical for the three study groups that are described below. Besides the differences in strength training that are described below, all the subjects performed the same running training sessions during the specific (intervention) period. We performed outcome measurements (stride length/speed (SLS) ratio and %SLS loss, see below) during the competition period only.

We used a randomized, controlled design. Trained middle-distance runners were randomly assigned to one of the following three training groups: experimental (*periodized strength*) group performing a specific periodized strength training program during the specific period of the macrocycle, a comparison (*non-periodized strength*) group performing the same type of strength

training exercises as the periodized group but in a non-periodized fashion, and a *control* group performing no strength training at all during the specific period.

The participants were not informed about the specific purpose of the study, so that their natural running style (stride length and frequency) was not influenced by participation in the study and were not given any advice concerning running technique or feed-back information related to running mechanics during the training sessions of the intervention period. We determined stride length and frequency only during the interval training sessions (i.e., performed at estimated race speed) included in the competition period that followed the specific period (see below).

Subjects

Eighteen trained male middle-distance runners completed the study (age: 25±4 years, weight: 63.7±3.9 kg; height: 174±4 cm; and body mass index (BMI): 21.1±1.2). All of the subjects were well-trained and subelite (regional) level athletes, i.e., their personal bests in 1500 m and 5000 m ranged from 3 min 41 s to 4 min 15 s and from 14 min 30 s to 16 min 0 s, respectively (mean ± SD of 3 min 57 s ± 12 s and 15 min 24 s ± 36 s, respectively). All subjects had previous experience with strength training. Twenty-four runners were initially selected for the study prior to group assignment, but six of them were excluded because of lack of adherence to the assigned training program. The study was reviewed and approved by an Institutional Review Board for research with human subjects.

Main Characteristics of Training and Periodization

The main organization of training in the three study groups is shown in Figure 2. Total weekly running volume (i.e., combining aerobic, anaerobic and basic conditioning training) ranged between 50 and 80 km·week⁻¹ over the 16-week macrocycle.

Preparatory period (mesocycle I; identical for all subjects). During the preparatory (i.e., basic training) period, all the subjects from the three groups performed a total of nine basic strength training sessions: three sessions based on isometric work, i.e., 3x30s, 3x45s, 3x60s with four exercises; two sessions using body weight type exercises (3-4 sets of 6-8 exercises reaching fatigue after 20-30 reps); and four resistance training sessions with machines and free-weights exercises with sets not carried to failure (2-4 sets corresponding to ~25 RM) at low velocities of movement (2s/2s concentric/eccentric actions) using machine (leg press, hamstring curls, calf raises) and free weight exercises (squats, power cleans and snatches). The aforementioned sessions served as strength-training familiarization sessions for the *periodized strength* and *non-periodized strength* groups.

During the preparatory period, basic endurance training consisted of 4-5 weekly continuous running bouts (40-60 min) at ~70% of maximal heart rate (HR_{max}) [i.e., at an intensity corresponding to the lactate threshold (LT)]. Adding up a total volume of 50-70 km·week⁻¹. Subjects also started performing some interval training sessions (two per week) at ~90%HR_{max} [that is, at an intensity corresponding to the maximal lactate steady state (MLSS)] with 1-min resting periods between reps, i.e., nine 3-min reps, seven 4-min reps and six 5-min reps.

Specific (intervention) period (mesocycles II, III and IV). Subjects assigned to the *periodized strength* group performed 2-3 weekly strength training sessions during the first two weeks (mesocycle II) of the specific period (Figure 3). These sessions progressively included eccentric contractions for hamstrings, fast eccentric-concentric contractions for calf muscles, concentric contractions for hip flexors until local failure between 20-30 reps and squat, snatch and clean training between 15 and 20RM with sets not carried to momentary failure. During the first two weeks of the specific period, the *periodized strength* group also performed circuit training with light loads including standing up exercises moving legs and arms with low loads and high speed movements with work/rest ratios of 40s/20s (i.e., classic "circuit training"). Some examples of exercises are as follows: "the soldier", i.e., full squat + 1 push-up + stand up, skipping with dumbbells and ankle weights, "scarecrow" (hips and shoulders abductions and flexions while jumping at a fast pace with dumbbells); rope skipping and jumping; power cleans and snatches; jumping splits and ¼ squat jumps with whole foot contact or straight-knee jumps with metatarsus contact and holding dumbbells. Finally, high-intensity aerobic circuit training (classic and modified Oregon circuit) was also performed at this initial stage of the specific period, with 10 reps of 50 to 100 m. There were no resting periods during the aforementioned circuit resistance exercises, i.e., snatch, clean, squat and split jumps with low loads were performed between the running reps.

Plyometric exercises (mainly horizontal jumps) were progressively added in mesocycle III (weeks 4 and 5) of the specific period in the *periodized strength* group, consisting of a fixed number of movements (10-15) performed at the fastest possible speed. Starting in the middle part of this period (week 4, corresponding to mesocycle III), subjects in the *periodized strength* group performed hill and circuit power training ("intermittent circuit") with short exercise and rest periods (15s/15s, 25s/15s). These sessions included specific exercises such as running with weighed vests or while pulling a load, skipping and vertical/horizontal jumps.

In the last part of the specific period (weeks 6 to 8 or mesocycle IV), resistance training consisted of running reps at increasing speeds while wearing 2-3 kg weighted belts (3-5% of body weight). Running speeds corresponded to the following 'metabolic' intensities: maximal aerobic speed ($\dot{V}O_{2\max}$) (total running time at $\dot{V}O_{2\max}$: 12-15 min), and lactic capacity training (8-20 reps of 200-500 m at 80-85% of personal best for the corresponding distance (200 to 500 m). As illustrated in Figure 2 (first and second rows under 'Endurance Training'), training was altered beginning with short reps and short rest periods, later with longer reps and longer rest periods, and finally with longer reps and short rest periods.

The *non-periodized strength* group performed all the aforementioned strength training means included in the program of the *periodized strength* group but with no week-to-week or sequential mesocycle variations during the specific period (2-3 sessions \cdot week⁻¹) (Figure 4).

Finally, runners in the *control* group did not perform any type of strength training at all (not even plyometrics) over the entire specific period.

Competition period (mesocycle V; identical for all subjects). During the competition period (final 4 weeks of the macrocycle) no specific strength training was performed by any of the three groups except i) some sporadic, light maintenance resistance sessions (one session every 2 weeks), similar to those included in the preparatory period and ii) some additional, light plyometric training (one session every 2 weeks). The aforementioned sessions were performed by all subjects. During this period we measured speed and stride length as indicated below.

Speed and Stride Length Measurement during the competition period

The stride length (cm) / speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (SLS) ratio (see below) allowed for the determination of the effects of the different type of interventions (periodized and non-periodized strength training, respectively, and control group performing no strength training) on the ability to maintain stride length during fatiguing running bouts, i.e., performed at competition speeds.

Only those running sessions performed at competition speeds during the competition period (i.e., interval training sessions such as 10 x 400m, 5 x 800m, 15 x 300m, or 8 x 500m) were recorded for analysis of speed and stride length. Running pace was set for every subject according to estimated race speed. Repetitions were usually performed until failure to hold the pace. If there was a competition close to testing, athletes performed the last high-intensity training session four days before the corresponding competition.

Recordings were performed using a digital video camera (JVC GR-DVL 9800E, Japan) at a frequency of 100 images \cdot s⁻¹ (100 Hz). Subjects performed every repetition of the interval training sessions in the inside lane of a 400 m track (Figure 5). A reference system was placed over a 10 m interval at a distance of 50 m from the end of the repetition. Four devices similar to a pole were held vertical on both the inside and outside of the lane to delineate the 10 m interval over which stride length and running speed measurements were obtained. The camera was placed perpendicular to the lane at a distance of 25 to 30 m away from the middle of the 10 m interval. Running speed was measured ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) from the time spent in the reference zone with a 0.01s accuracy. Stride frequency was calculated from the time to cover 4 ground contacts with the left foot (6 strides). The criterion for the attainment of ground contact was "initial contact of the foot". Average stride length was then calculated using speed and frequency in the 10 m interval of measurement. All measurements were made by the same researcher. Preliminary reliability analysis (repeated video recordings on three separate occasions) was determined in 10 runners over a 3-month period by the same researcher, showing no statistical differences ($P < 0.01$) and high intra-class correlation coefficient ($R > 0.95$) for the three repeated measurements of each of speed, frequency and stride length.

In order to obtain accurate data, we did not include recordings corresponding to speeds over $7.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ because the relationship between stride length and running speed starts to plateau above the aforementioned limit (18, 30). An average of six sessions was obtained per runner. We collected a

total of 111 training sessions for all subjects, ranging between 4 to 20 reps per subject per training session. The running rep distance was the same within each recording session.

We calculated the SLS ratio corresponding to the 1st and 3rd (last part) of each interval (i.e., race speed) training session. We obtained the % loss in SLS by comparing the mean values of SLS ratio corresponding to the 1st and 3rd part of each session. (See Figure 5 for an example). We finally determined the *mean* % SLS loss, i.e., of all recorded training sessions, for every runner.

Statistical Analyses

The Kolmogorov-Smirnov test was applied to ensure a Gaussian distribution of the data. After ensuring that the criteria of homogeneity of variance was met across the three groups using the Levene's test, a one-factor (group) analysis of variance (ANOVA) was used to determine differences in mean % SLS loss between groups (*periodized strength*, *non-periodized strength*, and *control*). The Tukey test was used as a post hoc test. Data are reported as mean \pm SD. The level of significance was set at $P \leq 0.05$ for all statistical analyses.

RESULTS

The data followed a normal distribution (Kolmogorov-Smirnov $Z = 0.90$; $p = 0.512$) and the criteria of homogeneity of variance was met ($P = 0.067$ for the Levene's test). The statistical power for group comparisons was 0.995. The ANOVA test showed a significant group effect ($P < 0.001$) for mean % SLS loss. We found significant differences for all post-hoc comparisons between the three study groups: $P = 0.014$ and $P < 0.001$ for *periodized strength* vs. *non-periodized strength* and *control* group, respectively; and $P = 0.015$ for *non-periodized strength* vs. *control* group) (Figure 6). The *periodized strength* group showed no significant change in SLS (i.e., no actual loss in means SLS) whereas the two other groups showed SLS loss.

DISCUSSION

This is the first study to determine the effects of a running *specific*, periodized strength training program on the capacity of endurance-trained runners to maintain stride length (SLS) during interval training sessions performed at competition speed. The main finding of this study was that this type of training program resulted in no loss of stride length during interval training sessions, as opposed to non-periodized strength training and no strength training, after both of which we observed losses in stride length from the start to the end of interval training sessions. The periodization training program employed a wide variety of strength training methods, from auxiliary Olympic lifting exercises to circuit training and specific speed training in overloaded conditions, in a sequence to maximize strength during running specific movements.

The effects of strength training on endurance performance have been previously assessed (5, 6, 13, 20, 21, 23, 26, 34, 35). The performance improvements brought about by this type of training seem to be associated with improved running economy (i.e., lower oxygen cost for a specific running speed) and a greater ability to sustain muscle power. A relevant study by Nesser et al (20) compared four different training approaches in junior cross country skiers: a 'traditional' training group training with body weight only, using a circuit of traditional exercises (until fatigue or with 30s/30s rest/exercise ratio); a non-skiing specific weight training group (using free weight and pulley type exercises at slow velocities of movement (3-8 RM) and long rest periods between sets and exercises to focus on strength development, and 10-12 RM resistance exercises performed explosively to focus on power development, a specific pulley ergometer ("rollerboard") training group using the same loads as the weight training group; and a ski specific training group that performed short uphill rollerskiing sprints, plyometric exercises specific to cross-country training, and uphill bounding with poles. Results reflected the importance of overload under specific conditions, since the major improvements in strength and power together with the best competition performances were achieved in the rollerboard group. The worst competition results were obtained in the non-skiing specific weight training group, which also showed the lowest improvements with training in both power and strength performance determined with specific ergometer (rollerboard) tests.

In swimmers, it also seems that combining normal swim training with specific strength exercises performed in water (with special ergometers such as a biokinetic swim bench, hydrochannel or other implements used in the water that are specific to swimming) elicits greater improvements in performance than swimming alone or combining both normal swim training with traditional dry-land strength training (17, 33, 35). In a preliminary report on recreational runners, Turner et al (36) found significant improvements in running economy with additional plyometric training versus a control

group that did not perform any type of strength training. In contrast, no improvement was observed in one time maximal jumping tests, which could be attributable to the fact that jumping tests involve single maximal efforts, as opposed to the multiple intense efforts used during plyometric training sessions. A recent study (29) conducted with very high level runners showed significant improvements in running economy due to the addition of plyometric training (three sessions per week for a total of 9 weeks) but also showed no differences in strength and power measurements.

Collectively the aforementioned results of previous research with runners and other endurance athletes, indicate one would expect that a strength training program specific to running would minimize the loss in SLS during interval training sessions. While previous research concerning periodized weight training indicating that periodized training is more effective than non-periodized training in causing maximal strength gains (7, 26, 27) and so would minimize SLS to a greater extent than non-periodized training. Our results do suggest that the periodized strength training program did affect the strength of the runners to a greater extent than a non-periodized program resulting in the periodized group having smallest loss of SLS during the interval training sessions. The sport specific periodized program showed no significant change in SLS while both the non-periodized strength training and no weight training (control) groups showed a significant decrease in SLS. The greater effect on strength of a *periodized* strength training program may have resulted in the significant difference in SLS loss between the periodized and non-periodized groups. While the effect on strength of a *sport specific* strength program may explain the significant difference in SLS loss between the non-periodized and the no strength training groups.

In summary, the present study's results indicate that a sport specific periodized strength training program attenuates loss of SLS in middle-distance runners during interval running sessions compared to a non-periodized strength training program and no strength training. While a non-periodized program does result in a loss of SLS, but the loss is less than shown with no strength training.

PRACTICAL APPLICATIONS

Our study showed that loss of stride length during an interval training session, a variable which is a key determinant of endurance running performance, can be minimized with a periodized sport specific strength training program. This type of training intervention seems to minimize the detrimental effects that fatigue has on muscle power levels. It is suggested that running coaches periodically monitor stride length/speed (SLS) ratio, a variable that represents a simple measurement of stability in mechanics during running. Specifically, the %loss of SLS over an intense (competition speed) interval running session can be used as an index of muscle fatigue or inability to maintain force levels while running at race pace. Further studies could directly measure strength-training effects under specific conditions (e.g., using the SLS index), as well as its relationship with actual performance and with those factors influencing performance, such as power or running economy.

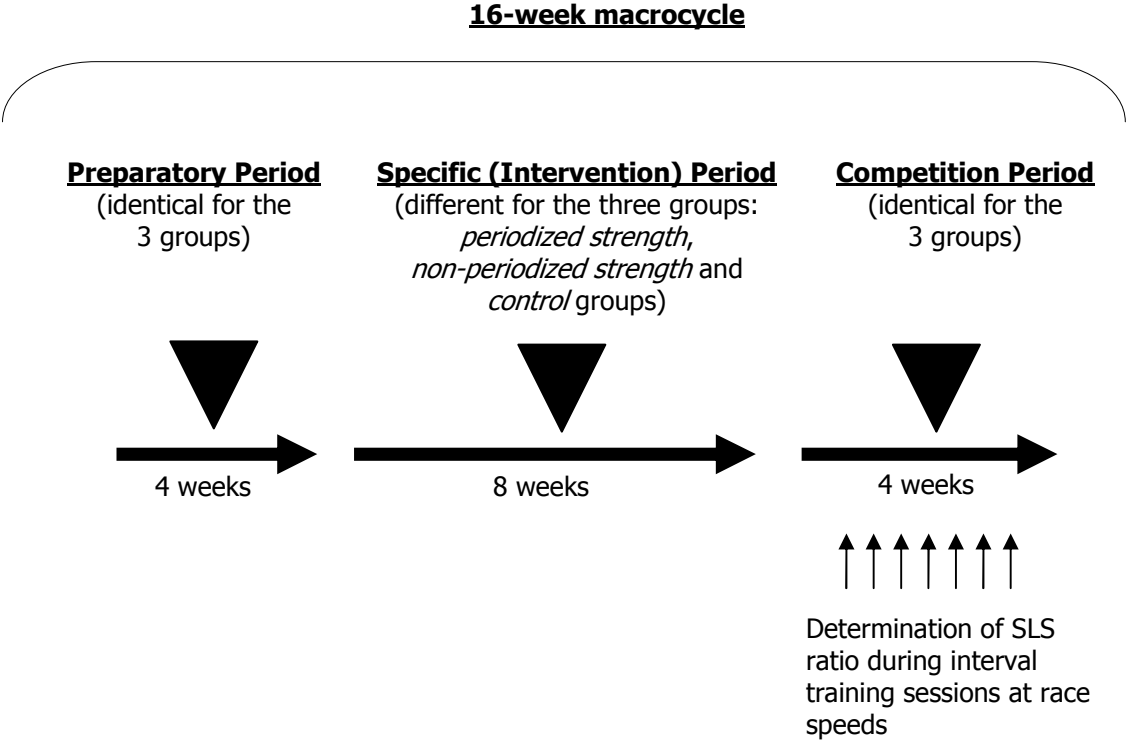
REFERENCES

1. BISHOP, D., AND D.G. JENKINS. The influence of resistance training on the critical power function and time to fatigue at critical power. *Aust. J. Sci. Med Sport.* 28: 101 – 105. 1996.
2. BRANDON, J.L. Physiological factors associated with middle distance running performance. *Sports Med.* 19:268 – 277. 1995.
3. BRAUN, W.A., M.G. FLYNN, M. GERTH, AND K. SMITH. The effect of strength training on endurance run performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32: (Suppl): 654. 2000.
4. BULBULIAN, R., A.R. WILCOX, AND B.L. DARABOS. Anaerobic contribution to distance running performance of trained cross-country runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 18:107 – 113. 1986.
5. CHTARA, M., K. CHAMARI, M. CHAOUACHI, A. CHAOUACHI, D. KOUBAA, Y. FEKI, G.P. MILLET, AND M. AMRI. Effects of intra-session concurrent endurance and strength training sequence on aerobic performance and capacity. *Br. J. Sports Med.* 39: 555-560. 2005.
6. EBBEN, W.P., A.G. KINDLER, K.A. CHIRDON, N.C. JENKINS, A.J. POLICHNOWSKI, AND A.V. NG. The effect of high-load vs. high-repetition training on endurance performance. *J. Strength Cond. Res.* 18:513–517. 2004.
7. ELLIOTT, B.C., AND A.D. ROBERTS. A biomechanical evaluation of the role of fatigue in middle-distance running. *Can. J. Appl. Sport Sci.* 5:203 – 207. 1980.
8. FLECK, S. Periodized strength training: A critical review. *J. Strength Cond. Res.* 13:82 – 89. 1999.
9. GAZEAU, F., J.P. KORALSZTEIN, AND V. BILLAT. Biomechanical events in the time to exhaustion at maximum aerobic speed. *Arch. Physiol. Biochem.* 105:583 – 590. 1997.
10. GREEN, H.J., AND A.E. PATLA. Maximal aerobic power: neuromuscular and metabolic considerations. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24:38 - 46. 1992.
11. HAUSSWIRTH, C., AND D. LEHÉNAFF. Physiological demands of running during long distance runs and triathlons. *Sports Med.* 31:679 – 689. 2001.
12. HAYES, P.R., S.J. BOWEN, AND E.J. DAVIES. The relationships between local muscular endurance and kinematic changes during a run to exhaustion at VO_{2max} . *J. Strength Cond. Res.* 18:898 – 903. 2004.
13. HOFF, J., A. GRAN, AND J. HELGERUD. Maximal strength training improves aerobic endurance performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 12:288 - 295. 2002.
14. JOHNSTON, R.E., T.J. QUINN, R. KERTZER, AND N.B. VROMAN. Strength Training in female distance runners: Impact on running economy. *J. Strength Cond. Res.* 11:224 – 229. 1997.
15. JONES, A.M., AND H. CARTER. The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. *Sports Med.* 29:373 - 386. 2000.
16. JUNG, A. P. The impact of resistance training on distance running performance. *Sports Med.* 33:539 - 552. 2003.
17. KISELEV, A.P. The use of specific resistance in highly qualified swimmers' strength training. *Sov. Sports Rev.* 26:131 – 132. 1991.
18. KNUTTGEN, H.G. Oxygen uptake and pulse rate while running with undetermined and determined stride lengths at different speeds. *Acta Physiol. Scand.* 52:366 -371. 1961.
19. NOAKES, T.D. Implications of exercise testing for prediction of athletics performance: a contemporary perspective. *Med. Sci. Sports Exerc.* 20:319 – 330. 1988.
20. NESSER, T. W., S. CHEN, R. C. SERFASS, AND S. E. GASKILL. Development of upper body power in junior cross-country skiers. *J. Strength Cond. Res.* 18:63 – 71. 2004.
21. NICHOLSON, R.M., AND G.G. SLEIVERT. Impact of concurrent resistance and endurance training upon distance running performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31 (Suppl.): 1559. 1999.
22. O'TOOLE, M.L., AND P.S. DOUGLAS. Applied physiology of triathlon. *Sports Med.* 19:251 – 267. 1995.
23. PAAVOLAINEN, L., K. HÄKKINEN, I. HÄMÄLÄINEN, A. NUMMELA, AND H. RUSKO. Explosive-strength training improves 5-Km running time by improving running economy and muscle power. *J. Appl. Physiol.* 86:1527 -1533. 1999.
24. PAAVOLAINEN, L., A. NUMMELA, H. RUSKO, AND K. HÄKKINEN. Neuromuscular characteristics and fatigue during 10km running. *Int. J. Sports Med.* 20:516 -521. 1999.
25. PETERSON, M.K., M.R. RHEA, AND B.A. ALVAR. Applications of dose-response for muscular strength development: a review of meta-analytic efficacy and reliability for designing training prescription. *J. Strength Cond. Res.* 19:950 -958. 2005.
26. PICHON, F., J.C. CHATARD, A. MARTIN, and G. COMETTI. Electrical stimulation and swimming performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 27:1671 – 1676. 1995.

27. RHEA, M.R., AND B.L ALDERMAN. A meta-analysis of periodized versus nonperiodized strength and power training programs. *J. Strength Cond. Res.* 75:413-422. 2004.
28. RHEA, M.R., W.T. PHILLIPS, L.N. BURKETT, W.J. STONE, S.D. BALL, B.A. ALVAR, AND B.A. THOMAS. A Comparison of linear and daily undulating periodized programs with equated volume and intensity for local muscular endurance. *J. Strength Cond. Res.* 17:82 – 87. 2003.
29. SAUNDERS, P.U., D.B. PYNE, R.D. TELFORD, E.M. PELTOLA, R.B. CUNNINGHAM, and J.A. HAWLEY. Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *J. Strength Cond. Res.* 20:947-954. 2006.
30. SCHOLICH, M. East German study of distance stride. *Track Technique* 74:2355 -2359. 1978.
31. SHIM, J., E.O. ACEVEDO, R.R. KRAEMER, R.W. HALTOM, AND J.L. TRYNIECKI. Kinematic changes at intensities proximal to onset of lactate accumulation. *J. Sports Med. Phys. Fitness* 43:274 – 278. 2003.
32. SPURRS, R.W., A.J. MURPHY, AND M.L. WATSFORD. The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 89:1 – 7. 2003.
33. TANAKA, H., D.L. COSTILL, R. THOMAS, W.J. FINK, AND J.J. WIDRICK. Dry-land resistance training for competitive swimming. *Med. Sci. Sports Exerc.* 25:952 -959. 1993.
34. THOMPSON, H.L., and G.A. STULL. Effects of various training programs on speed of swimming. *Res. Q.* 30:479 - 485. 1959.
35. TOUISSANT, H.M., AND K. VERVOORN. Effects of specific high resistance training in the water on competitive swimmers. *Int. J. Sports Med.* 11:228 - 233. 1990.
36. TURNER, A.M., J.M. OWINGS, AND J.A. SCHWANE. Six weeks of plyometric training improves running economy. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31(Suppl.) Abstract 1556. 1999.
37. WEYAND, P.G., D.B. STERNLIGHT, M.J. BELLIZZI, AND S. WRIGHT. Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *J. Appl. Physiol.* 89:1991-1999. 2000.

FIGURE LEGENDS

Figure 1. Schematic representation of the study design.



Abbreviation: SLS (step length (cm) / speed ($m \cdot s^{-1}$))

Figure 2. Main organization of training in the three study groups.

PREPARATORY PERIOD	SPECIFIC (INTERVENTION) PERIOD (total duration: 8 weeks)			COMPETITION PERIOD
Mesocycle I	II	III	IV	V
4 weeks	2 weeks	3 weeks	3 weeks	4 weeks
ENDURANCE TRAINING (identical for all groups)				
	MLSS intervals	Peak velocity intervals	Lac Cap intervals	Lac Power short reps
Basic LT	Fartlek training	MLSS long reps	Peak Velocity long reps	Competition Pace / Competition
STRENGTH (<i>periodized</i> group only)				
Basic strength training *	Circuit training Weight training	Oregon circuit Plyometrics Intermittent circuit Hills	Specific competition speed with belts (intervals)	Eventual strength training
STRENGTH (<i>non-periodized</i> group only)				
Basic strength training *	2-3 sessions per week mixing the following contents: <ul style="list-style-type: none"> . 1-2 sessions of circuit training / basic weight training . 1 hill session . 0-1sessions of speed work with belts (intervals) 			Eventual strength training

Abbreviations and explanations: LT (lactate threshold), MLSS (maximal lactate steady state) (both obtained from field (track) lactate testing); Peak Velocity (peak velocity obtained from a progressive running test on a track until exhaustion (starting at a pace of 4 min 30 s per km, speed was increased by 0.2 km·h⁻¹ every 200m); Lac Cap (Lactic Capacity); Lac Cap Interval (intervals at 80-85% of personal best for the corresponding interval distance), Lac Power (Lactic Power); Lac Power short reps (reps at 90-95% of personal best for the corresponding interval distance)
 Symbol: * During the preparatory period, all the subjects from the three groups performed the same nine basic strength training sessions (see text for details).

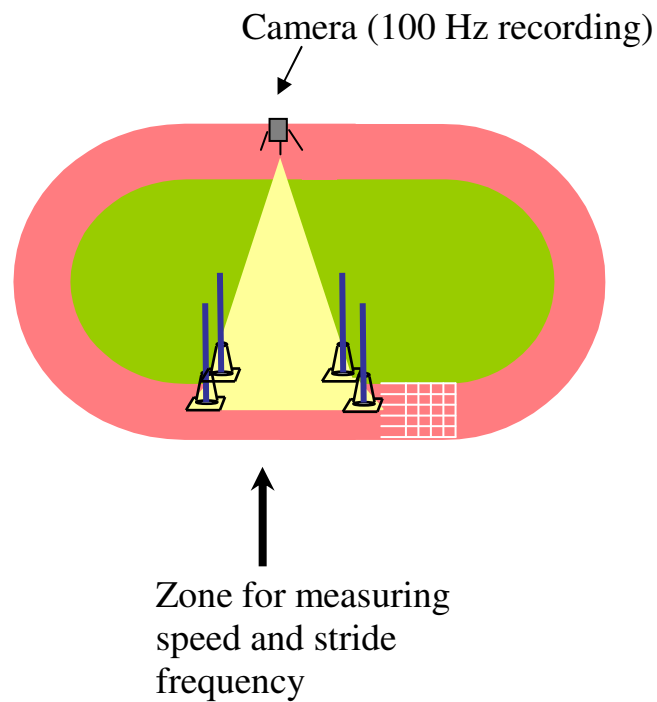
Figure 3. Strength training means in the *periodized strength group* during the specific period. Each "X" symbol represents a session in which the corresponding training mean was used. Total number of strength training sessions = 20.

MESOCYCLE	II		III			IV		
WEEK	1	2	3	4	5	6	7	8
Weight training	XX	X						
Circuit training	X	XX						
Oregon circuit			XX	X				
Intermittent circuit				X	X			
Plyometrics				X	X			
Hills				X	X			
Weighted belts						X	XX	XX

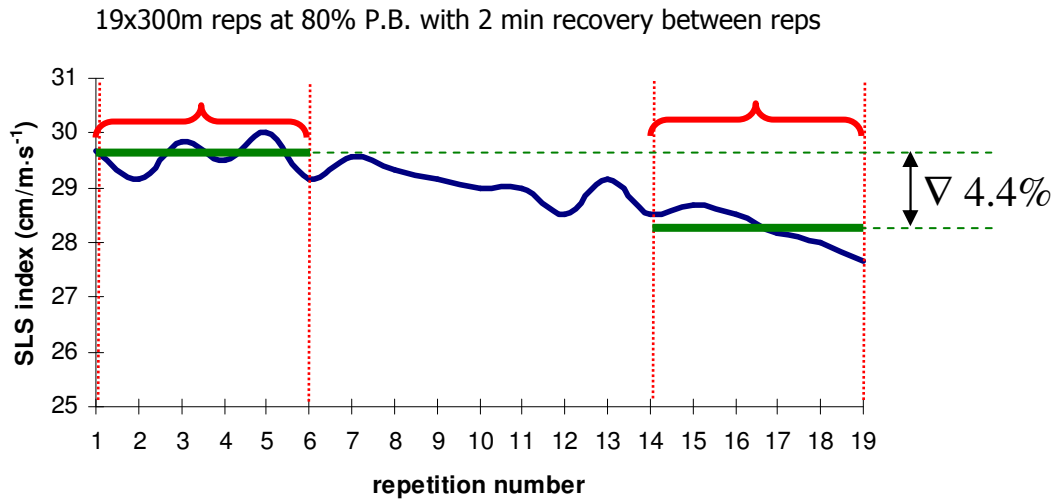
Figure 4. Strength training means in the *non-periodized strength group* during the specific period. Each "X" symbol represents a session in which the corresponding training mean was used. Total number of strength training sessions = 20.

MESOCYCLE	II		III			IV		
WEEK	1	2	3	4	5	6	7	8
Weight training	X	X		X	X		X	X
Circuit training	X		X		X		X	
Oregon circuit								
Intermittent circuit								
plyometrics		X		X		X		
Hills	X		X		X		X	
Weighted belts		X		X		X		

Figure 5. Determination of the stride length (cm) / speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (SLS) ratio and % loss in SLS during the competition period. We determined % loss in SLS by comparing the mean SLS ratio corresponding to the 1st and 3rd (last) part, respectively, in each of the recorded interval training sessions that were performed at race speeds during the competition period (see text for details). In the first example the ∇ symbol denotes actual loss in SLS, i.e., loss in SLS when comparing the mean SLS value corresponding to the 1st third of the interval training session (reps 1-6) and the mean SLS value corresponding to the last third of the session (reps 14-19). In the second example the Δ symbol denotes no loss (and actual increase) in SLS, i.e., increase in SLS between the mean SLS value corresponding to the 1st third of the interval training session (reps 1-5) and the mean SLS value corresponding to the last third of the session (reps 9-13).

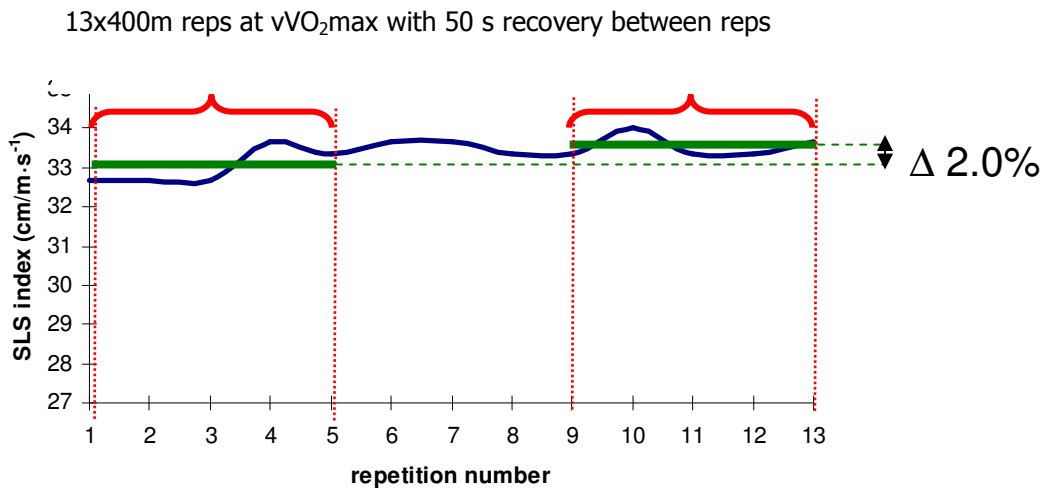


Example of % SLS loss determination in a subject from the *control* (No-Strength) group



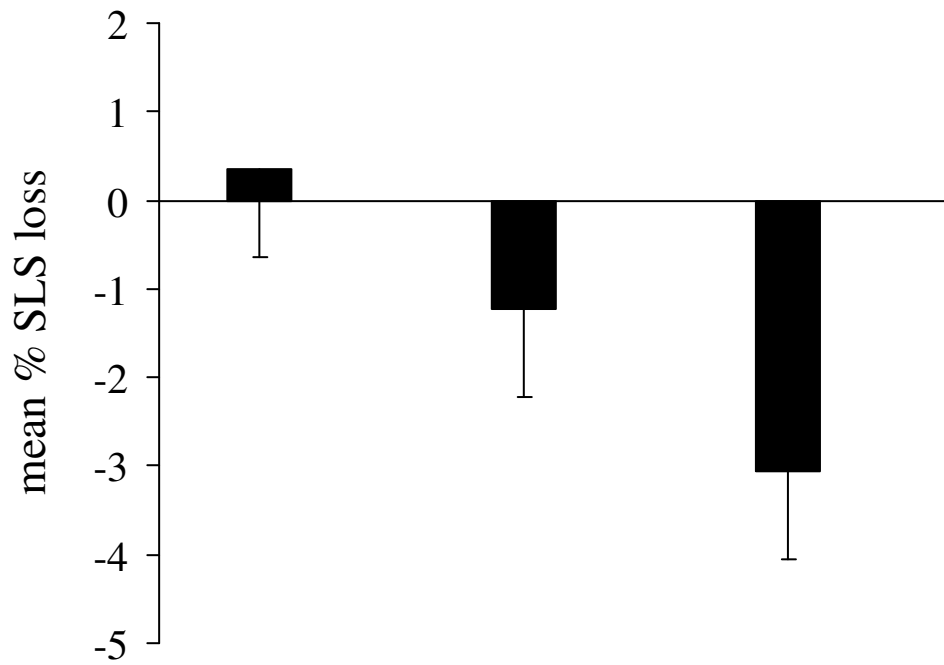
Abbreviations: P.B. (personal best)

Example of % SLS loss determination in a subject from the *periodized strength* group



Abbreviations: $v\text{VO}_{2\text{max}}$ (maximal aerobic speed)

Figure 6. Comparison of mean % SLS (stride length (cm) / speed (m·s⁻¹)) loss between the three study groups. Abbreviations: Periodized (*periodized strength* group), Non-Periodized (*non-periodized strength* group), Control (no strength group). Symbols: **P*<0.05 for between-group comparisons; †*P*<0.014 for between-group comparisons.



Estudio 4:

¿Qué variables fisiológicas evaluadas durante un programa de entrenamiento se relacionan con el rendimiento en carrera de resistencia?

(Which physiological variables assessed over a training program are related with endurance running performance?)

Title: Which physiological variables assessed over a training program are related with endurance running performance?

Brief running head: Testing and endurance running performance

Authors: Jonathan Esteve-Lanao¹, Fernando Naclerio¹, Javier España¹, Matthew Rhea², Steven J. Fleck³, Alejandro Lucia¹

¹ European University of Madrid, Madrid, SPAIN

² Department of Interdisciplinary Health Sciences, AT Still University, Mesa, Arizona, USA

³ Sport Science Department, Colorado College, Colorado Springs, CO, USA

Address for correspondence:

Jonathan Esteve-Lanao.

European University of Madrid.

28670 Madrid, Spain.

Fax number: 34 91 616 82 65.

E-mail: jonathan.esteve@uem.es

ABSTRACT

The main purpose of this study was to assess in trained endurance runners (N = 5; 27±3 years, maximal oxygen uptake (VO₂max): 68.0±5.6 mL·kg⁻¹·min⁻¹) the relationship between a broad number of indices indicative of different physiological capabilities (performance in jumping tests, maximal muscle strength and power, peak 'aerobic' running velocity, VO₂max, blood lactate (BLa) levels at high running speeds, the ability to maintain stride length or running economy) during each of the three main periods of a 24-week macrocycle (i.e., preparatory, specific and competition), and running competition performance (cross-country, 35-45 min duration). Among the results of physiological variables obtained during the three periods, we found the following significant correlations (*P*<0.05, with a R² value ≥0.85) with running performance in the competition period (finishing time, in s): R = 0.941 for BLa@19 km·h⁻¹ (specific period); R = 0.958 for BLa@17 km·h⁻¹, R = 0.956 for BLa@19 km·h⁻¹, and R = -0.949 for peak running velocity (competition period). Multiple regression analysis indicated the importance of determining BLa at ≥ cross-country competition speeds (over the three periods of the macrocycle) and 1RM strength (in the preparatory period) in order to predict actual running performance in the competition period. Our results emphasize the practical usefulness of routinely assessing blood lactate levels in training sessions over a macrocycle and 1RM strength at the start of a macrocycle to adequately monitor an endurance runners's progress during training.

INTRODUCTION

Endurance running performance has been traditionally associated with a complex interplay of several physiological factors, including: i) a high maximal oxygen uptake (VO_{2max}); ii) the ability to sustain a high percentage of VO_{2max} before blood lactate accumulation occurs; and iii) the ability to move efficiently, i.e., 'cost of running' or 'running economy' (12). However, more recent research places a growing emphasis on other variables such as the peak running velocity (or 'peak aerobic velocity') achieved during gradual testing to exhaustion (27) or anaerobic capacity/power (34). These factors interact with each other to determine actual performance, e.g., the surprisingly low VO_{2max} values reported in some Olympic class runners (e.g., $< 70 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) can be compensated for by an exceptionally high economy (12).

Muscle strength and muscle strength training are also important given their documented influence in at least some of the aforementioned variables. For instance, strength development can increase the VO_{2max} of low level runners (13, 14, 18, 23, 35), though this effect is less clear in athletes of a high competition level (4, 15-17, 28, 29). A few studies have shown strength training-induced increases in the workload eliciting lactate threshold during running (26), though again in non-elite athletes. Stronger evidence exists on the positive effects of strength training on several running performance determinants, mainly running economy (6, 17, 32, 34, 37). A key determinant of running economy is the ability to maintain power in fatiguing situations (that is, the ability to minimize loss of stride length during high intensity running bouts) which can be improved with sport specific, periodized strength training (10). From a practical point of view, the ability to maintain stride length at competition speeds can be determined with the stride length/speed (SLS) ratio (10).

Numerous studies have reported the relationship between the aforementioned variables and endurance running performance at a given time point of a competition season. However, longitudinal approaches are needed to assess how these variables obtained during 'routine' physiological testing performed over a typical training program designed to obtain peak competition performance at the end of the training (i.e., training macrocycle), relate to actual competition performance. This would help in predicting actual performance and adjusting training based on the results obtained in physiological testing performed over the season, thus allowing coaches to identify those specific aspects of their training interventions (e.g., 'base' aerobic work, VO_{2max} training, speed work, strength training, etc) on which they should put special emphasis during each period (preparatory, specific or competition) of a training macrocycle. Further, it would also assist in the optimization of test batteries to judge training progress for runners over the different periods of a macrocycle season, i.e., by i) emphasising the assessment of key determinant indices during a given period of a macrocycle (e.g., maximal strength during the preparatory period or VO_{2max} during the preparatory period) and ii) possibly avoiding the assessment of variables which are less important during a given period (e.g., peak running velocity during the preparatory period). Accordingly, the main purpose of this study with trained endurance runners was to assess the relationship between a broad number of physiological indices indicative of different physiological capabilities that may be related to endurance running performance (jumping tests, maximal muscle strength and power, peak 'aerobic' running velocity, VO_{2max} , blood lactate levels at competition running speeds, the ability to maintain stride length and economy) assessed during each of the three main periods of a typical macrocycle (i.e., preparatory, specific and competition) and running performance (cross-country, 35-45 min duration) during the competition period. This research design allows the determination of which variables assessed over the different periods of the season can best predict peak competition performance.

METHODS

Experimental Approach to the Problem

This study employed a descriptive, longitudinal design. The intervention (training) period (see below for details) consisted of a typical 24-week macrocycle (cross-country season, starting in early September and ending with the regional cross-country championships held in Madrid (Spain) in mid-February). Runners were evaluated three times over the macrocycle including a simulated cross country race and a full battery of physiological tests in each of the three evaluations which corresponded to the preparatory, specific and competition periods, of the macrocycle (see below for more details on each evaluation). The first, second and third evaluations corresponded to the start (weeks 7-8, preparatory period), mid-portion (weeks 15-16, specific period) and end (weeks 23-24, competition period) of the macrocycle, respectively (Figure 1). Thus, the time elapsed between each of the three evaluations was

identical. The third set of evaluations was performed within a week after the aforementioned cross-country race.

All the subjects had the same competition goal (with a main target on the aforementioned regional cross-country championships at the end of the competition period) and participated in the same races over the macrocycle (five cross country races (9-11 km distance) from mid November to mid February and two road races (8-10 km) between mid and end December), as indicated in Figure 1. All subjects took a 1-month rest (transition) period prior to the start of the macrocycle during which the study took place. Thus in order to overcome the fast improvements in most indices of fitness level that are expected to occur in the initial part of a macrocycle that follows a deconditioning period, the first set of evaluations was performed in weeks 7-8 instead of week 1.

In order to objectively quantify training loads during all running sessions (see below), each subject wore a HR telemeter during each training session (Accurex Plus, Polar Electro OY; Finland). At the start of the study period all subjects performed a laboratory treadmill test for determination of training intensity zones based on the heart rate (HR) values eliciting the ventilatory (VT) and respiratory compensation thresholds (RCT) (9, 11). This allowed dividing the intensity of each running training session into three 'intensity zones', i.e., 'zone 1' or 'light intensity' (<VT), 'zone 2' or 'moderate intensity' (between VT and RCT) and 'zone 3' or 'high intensity' (>RCT) (9, 11). Previous research has shown that HR values at the VT and RCT remain stable over a training season and thus a single test at the start of the season is sufficient to prescribe exercise intensities based on HR zones (22). In order for our study and training protocol to be repeatable by other scientists and coaches, we scored the total training load (i.e., volume x intensity) of each session using a practical, recently modified approach to the *training impulse* (TRIMP) method, i.e., 1 min in zone 1 = 1 TRIMP, 1 min in zone 2 = 2 TRIMPs and 1 min in zone 3 = 3 TRIMPs (9, 11).

Subjects

The institutional research ethics committee approved the study and the subjects provided informed consent prior to participation. Ten distance male runners well habituated to participate as subjects in scientific training studies were originally selected as subjects. Five subjects (age: 27±3 years (mean±SD), height: 174±3 cm; weight: 68.1± 4.5 kg; VO₂ max: 68.0±5.6 mL·kg⁻¹·min⁻¹) completed all aspects of the study including: i) the test battery corresponding to each of the three testing evaluations, including the simulated competition races (with a maximal intra-individual % variation in mean HR values between the three simulated races ≤5%) and ii) at least 95% of all originally prescribed training sessions (including complete HR recording in each session). Seven subjects met the 2nd criteria but failed to complete the third testing battery. In the five subjects who completed all aspects of the study, personal bests in 10 km (road race) ranged from 30 min 40s to 33 min 0 s (32 min 31 s ± 50 s or 83.1% of the World Record).

Main Characteristics of Training and Periodization

All subjects trained in the area around Madrid, Spain (~ 600 m altitude). All of them are coached by one of the authors (J.E-L, who is a professional coach). Subjects performed each training session under the supervision of this coach and an assistant coach (J.E, another of the authors).

The study macrocycle was composed of six mesocycles (one initial 3-week mesocycle plus five 4-week mesocycles) and was divided into three main periods: preparatory (first three mesocycles (weeks 1-11)); specific (next two mesocycles (weeks 12-19)); and competitive (last mesocycle (weeks 20-23)) (Figure 1). Each four-week mesocycle had a 3:1 load structure, i.e., three weeks of high load followed by an 'easy' week (30) except the last two mesocycles in the competition period given the high number of races (one every two weeks) held in these mesocycles.

Overall, training periodization was developed on a "block system" focusing on progressive development of competitive metabolic demands from light to high intensities together with specific strength needs. We used a 'polarized training organization' (i.e., with a higher relative contribution of zones 1 (basement training) and 3 (high intensity training) at the expense of zone 2 (medium intensity)), which has recently shown efficacy for maximizing training gains in actual endurance running performance over more traditional approaches (with high contribution of zone 2) (9). Main training characteristics in each mesocycle are shown in Figure 2. Total weekly running volume and total running load (volume x intensity, including races in the competition period) using the aforementioned TRIMP approach are shown in Figure 3. Briefly, running distance averaged ~80-90 km·week⁻¹ over the macrocycle, increasing through the preparatory period to reach a maximum of

~120 km·week⁻¹, and decreasing over the competition period (mean of 40-50 km·week⁻¹). Overall, running intensity followed the opposite pattern. Although considerable variations existed depending upon the period of the macrocycle and the 'hard' or 'easy' weeks of each mesocycle, the runners' usual training weekly program included two 'hard' (zone 3) sessions·week⁻¹ (including interval or repetition workouts at high intensities) and one or two strength training sessions·week⁻¹ (see below). The remaining sessions were composed of continuous training (performed mainly in zones 1-2).

Strength training drills and exercises were performed using a periodized, running specific strength approach that has recently shown its efficacy in runners of a similar competitive level to that of the present subjects (10). During the preparatory (i.e., basic training) period, all subjects performed a total of nine basic strength training sessions: three sessions based on isometric work, i.e., 3x30s, 3x45s, 3x60s with four exercises; two sessions using body weight type exercises (3-4 sets of 6-8 exercises reaching fatigue after 20-30 reps); and four resistance training sessions with machines and free-weight exercises with sets not carried to failure (2-4 sets corresponding to ~25 RM) at low velocities of movement (2s/2s concentric/eccentric actions) using machine (leg press, hamstring curls, calf raises) and free weight exercises (squats, power cleans and snatches). The aforementioned sessions served as familiarization sessions to the strength training exercises performed in later portions of the macrocycle.

The runners performed 2-3 weekly strength training sessions during the first two weeks of the specific period. These sessions progressively included eccentric muscle actions for the hamstrings, fast eccentric-concentric muscle actions for calf muscles, concentric muscle actions for the hip flexors until concentric failure between 20-30 reps and squat, snatch and clean training between 15 and 20RM not reaching failure. The sessions also included circuit training with light loads including standing up exercises moving the legs and arms with low loads and high speed movements with work/rest ratios of 40s/20s (i.e., classic "circuit training"). Some examples of exercises are as follows: "the soldier", i.e., full squat + 1 push-up + stand up, skipping with dumbbells and ankle weights, "scarecrow" (hips and shoulder abductions and flexions while jumping at a fast pace with dumbbells); rope skipping and jumping; power cleans and snatches; jumping split squats and ¼ squat jumps with whole foot contact or straight-knee jumps with metatarsus contact while holding light dumbbells. Finally, high-intensity aerobic circuit training (classic and modified Oregon circuit) was also performed at this initial stage of the specific period, with 10 reps of 50 to 100 m. There were no rest periods between the aforementioned reps as they were interspersed with resistance exercises (snatch, clean, squat and split jumps with low loads). In mesocycles 2 and 3 of the specific period subjects also performed maximal strength training sessions (with gradually increasing loads from 70 to 90%1RM), mainly with half squat exercises on a multipower device (Technogym 2SC, Tecnogym, Gambettola, Italy). In mesocycle 4, subjects trained with the load and number of reps only eliciting peak power in the corresponding exercise whereas in mesocycle 5, reps were continued until occurrence of a 20-25% decay in power.

Plyometric exercises (mainly horizontal jumps) were progressively added in mesocycles 4 and 5 of the specific period, consisting of a fixed number of movements (10-15) performed at the fastest possible speed. Starting in the middle part of this training period, subjects performed hill and circuit power training ("intermittent circuit") with short exercise and rest periods (15s/15s, 25s/15s). These sessions included specific exercises such as running with weighed vests or while pulling a load, skipping and vertical/horizontal jumps. In the last part of the specific period, resistance training consisted of running reps at increasing speeds while wearing 2-3 kg weighted belts (or 'vests'), equivalent to 3-5% of body weight).

During the competition period no specific strength training was performed by the subjects except some sporadic, light maintenance resistance sessions (one session every 2 weeks), similar to those included in the preparatory period and ii) and some additional, low volume plyometric training (one session every 2 weeks).

Evaluations during the macrocycle

As each testing battery included as many as 11 tests in total, each of the three evaluations of the macrocycle was performed over a two-week period (Figure 4). The testing battery schedule was identical in the three evaluations and each specific test was consistently performed at the same time of the day in the three evaluations. Finally, in the three evaluations, the two-week period of testing corresponded to a reduced training load phase with the goal of achieving overcompensation from the previous training. Runners were well familiarized with most of the testing procedures (which are

detailed below) from previous training seasons and the first six weeks of the macrocycle were used for familiarization with those tests to which they were less habituated. Preliminary reliability analysis with the same researcher (J E-L) in 10 runners showed high intra-class correlation coefficient ($R > 0.95$) for the repeated measurements of most of the tests, which are described below. Finally, verbal encouragement was given to the subjects by the same two researchers in all the tests.

Anthropometry. The subject's body mass and body mass index (BMI) was recorded, along with six skinfold measurements (triceps, subscapular, supra-iliac, abdominal, front thigh and median calf) using standard equipment (Holtain, Crymych, UK). All the skinfold measurements were made in triplicate by the same researcher.

Vertical jump tests. Squat (SJ) and counter-movement jumps (CMJ) tests were performed using a contact mat (Globus Ergo Tester, Codognè, Italy) with both hands on the hips and reaching 90° of knee flexion angle (5). Subjects were allowed to perform two trials separated by a two-minute rest period. Tests of 60 s vertical rebound jump series (60s repeated jumps or 60RJ) were also conducted using the contact mat with subjects keeping a straight-knee position (3); during this test subjects were required to complete repeated maximal height jumps with the minimal possible ground contact time over a 60 s period (which for the present subjects resulted in a total of ~ 100 jumps). To obtain an index of the rate of decline and increase in jump height and foot contact time, respectively, we calculated the % difference between the first 10 and the last 10 jumps and between the first 30 and last 30 jumps.

100-meter running stride test. Subjects were required to run 100 m on a flat track as fast as possible and with the lowest possible number of steps. Performance time was counted from the first movement of the back foot until the trunk crossed the finish line by the same investigator with a stopwatch to the nearest 0.1 s. Number of steps was counted by two observers in all the tests from the first foot contact until the last foot contact after crossing the finish line. In the case of the subject falling after the finish line when the trunk crossed the finish line, the last step was computed as a "half step". In order to use an index integrating both time to cover the distance and number of strides, the two aforementioned variables were multiplied (step number x time (s)), i.e., a low score reflected better performance in this test.

Squat test (1RM). Squat tests for maximal strength (1RM) and maximal power determination (see below) were performed on separate days on a multipower device (Technogym 2SC, Tecnogym, Gambettola, Italy). The counterweight system was removed from the device resulting in the weight of the barbell + chains equaling 18 kg. Subjects were allowed to adopt their preferred body position while achieving a 90° angle of knee flexion during the test. One-repetition maximum (1RM) was estimated from subjects' best scores in 2 to five 5 RM tests using the predicting equation developed by Wathan et al. (38) which has been shown to be valid for 1RM determination (19). Total external weight lifted was also reported relative to body weight and added to actual body weight when calculating the 1RM (8).

Power squat test. Mechanical power was evaluated using a modified approach to the method developed by Baker *et al.* (2) with a test using gradually increasing resistances (+ 10 kg, i.e., from 28 to 98 kg) with no rebound, i.e., subjects were instructed to flex their knees to 90° slowly and then perform maximal speed concentric actions without jumping. The best power and speed value at every load was selected for analysis with a rotational encoder system (Globus Real Power, Codognè, Italy) that was placed parallel to the movement of the barbell from a lateral view and perpendicular to the ground (25). Power values were assessed during two repetitions with a minimal rest between repetitions and two min between loads. We reported values of maximal power, maximal power + body weight (8), velocity at maximal power, and % of 1RM at which maximal power was attained.

Test of maximal running frequency. This is a common drill used for technique training in runners for assessing their ability to produce a stable and natural running style at high speed while keeping maximal stride frequency. In each evaluation, subjects performed three trials at maximal sprint velocity over a 17 m flat distance which 11 cardboard devices (height: 17 cm) separated from each other by 1.7 meters. They were required to cover the aforementioned distance as fast as possible with one foot contact at every space between the devices without hitting the devices. Two photocell barriers (Telemechanique, France) were located 20 cm over the initial and last device to allow determination of time and frequency (10 steps divided by time). The best attempt without hitting the devices was selected for statistical analysis.

Graded running test. Subjects completed a graded (ramp-like) running test until volitional exhaustion on a treadmill (Technogym Run Race 1400 HC, Gambettola, Italy). Following a general warm-up, the graded test started at 11 km·h⁻¹, and running speed was increased by 0.5 km·h⁻¹ every 30 s until volitional exhaustion. Treadmill inclination was kept constant at 1.0% in an attempt to mimic the effects of air resistance on the metabolic cost of flat outdoor running (31). The same protocol was previously used in our laboratory for testing competitive endurance runners (30). During all the graded and constant-load tests (see below), gas exchange data were collected continuously using an automated breath-by-breath system (Vmax 29C, Sensormedics Corp., Yorba Linda, CA, USA), which was calibrated before each exercise test according to the manufacturer's instructions. Volume calibration was performed at different flow rates with a 3-litre calibration syringe (SensorMedics Corp., Yorba Linda, CA, USA) allowing an error ≤ 2%. Calibration of the gas analysers was performed automatically by the system using both ambient and precision reference gases (16%O₂, 4%CO₂).

Peak aerobic running velocity or simply 'peak velocity' was set as that corresponding to the last 30-s completed stage. Maximal oxygen uptake (VO₂ max) was recorded as the highest VO₂ value obtained for any continuous 30 s period during the test. At least two of the following criteria were also required for the attainment of VO₂ max: a plateau in VO₂ values (i.e., an increase in VO₂ between two or more consecutive stages of less than 1.5 ml·kg⁻¹·min⁻¹ (30)), a respiratory exchange ratio value ≥ 1.15, or the attainment of a maximal HR value (HRmax) above 95% of the age-predicted maximum (220 – age).

Constant-speed running tests. The subjects completed three 6-minute constant-speed running bouts on the aforementioned treadmill at 14, 17 and 19 km·h⁻¹, respectively at a constant 1.0% inclination. The running speeds were separated by 5-min recovery periods. These three running speeds were chosen as being representative of 'moderate' intensity (14 km·h⁻¹), 'high' intensity (17 km·h⁻¹, or 10 to 15 km competition speed) and 'very high' intensity (19 km·h⁻¹, or 5 to 10 km competition speed). We determined the average VO₂ cost (in mL O₂·kg⁻¹·min⁻¹) for the last 3-min period of each bout while mean 'running economy' for the three bouts was determined in mL O₂·kg⁻¹·km⁻¹ (12). Capillary blood samples for the measurement of blood lactate (BLa) with an automated analyser (Lactate Pro LT-1710, Arkray KDK, Japan) were obtained from a fingertip immediately (15-20 s) after completion of each submaximal running bout.

Tests at peak velocity for peak time limit and stride length/speed (SLS) ratio determination. The subjects performed a running bout until volitional exhaustion on the aforementioned treadmill (with a 1% inclination) at the peak velocity previously obtained during the graded treadmill test of the corresponding testing battery to determine time limit at peak velocity (or simply 'peak time limit'). This test was also used to determine the stride length (cm) / speed (m·s⁻¹) (SLS) ratio (see below), an index of the runners' ability to maintain stride length during fatiguing running bouts (i.e., performed at high speeds) (10). We determined the % loss in SLS ratio between the last third and the first third of the total running bout duration at peak velocity (10). Recordings of stride were performed with a digital video camera (JVC GR-DVL 9800E, Japan) at a frequency of 100 images·s⁻¹ (100 Hz) as described elsewhere (10).

Simulated Competition. In each of the three evaluations, all subjects performed (as a group, not individually) the simulated competition test (11.5-km cross-country race) on the same loop and under similar wind and environmental conditions. We have previously used this type of simulated competition for investigative purposes (9) and all the subjects had previous experience with this type of test before entering the study. The cross-country loop was similar to that of the target competition held at the end of the season and subjects were instructed to perform maximally. All subjects were familiar with this loop which is frequently used in their training sessions. Verbal encouragement was given to the subjects and all the tests were preceded by the typical pre-competitive rest period (i.e., ≥2-3 days of overall easy training, except for the previous constant-load tests) (Figure 4)) to simulate actual competition conditions. All subjects wore a HR telemeter during each simulated competition in order to compare the exercise intensity of the three races and thus to ensure a similar level of effort in all simulated races (i.e., maximal intra-individual variation in mean HR values between the three simulated races ≤5%, as mentioned above).

Statistical Analysis

Statistical analyses were performed with the Statistical Package for Social Sciences (SPSS) 13.0 software (SPSS Inc., Chicago, IL). Given the small sample size (and thus in order to avoid having a statistical type I error), we used the non-parametric Friedman test to compare the mean values of

performance time in the simulated competition and all the physiological variables obtained in the three testing batteries. The Tukey test was applied as a post hoc test. This statistical comparison allowed us to confirm the adequacy of the training program to obtain actual improvements in performance from the start (preparatory period) to the end (competition period) of the macrocycle. Pearson's correlation coefficients were determined between each of the variables obtained in the three testing batteries performed over the macrocycle (corresponding to the preparatory, specific and preparatory period) and running performance at the end of the macrocycle (that is, during the competition period). Given the small sample size, we only reported those relationships with a R^2 value ≥ 0.85 . We also applied a multiple regression analysis using a stepwise method to determine which of the variables (VO_{2max} , running economy, SJ, 1RM, etc) corresponding to each of the three evaluations over the macrocycle were predictor variables of running performance at the end of the macrocycle.

The level of significance was set at 0.05. Results are expressed as mean \pm SD and Pearson's correlation coefficients were reported with the corresponding standard error of estimate (SEE) and 95% confidence limits (95%CL).

RESULTS

The mean results of the three evaluations over the macrocycle are shown in Table 1. The training program was successful in improving competition performance ability as performance time significantly improved from the 1st to the 3rd evaluation, i.e., ~6% improvement. This improvement value is similar or slightly higher than that previously reported by us in runners over a training (macrocycle) intervention (9). Furthermore, four of the present subjects reached their personal best in a 10 km road race held in mid December (corresponding to week 15 of the macrocycle) and four of them finished in the top 15 position in the target competition of the macrocycle, i.e., Madrid Regional Cross Country Championships (week 23) held one week before the simulated competition. Several physiological indices obtained during longitudinal evaluation (mainly maximal strength in the squat test, mean economy, peak velocity, step number x time index in the 100m running stride test or the % loss in the SLS index) also improved (or tended to improve) over the macrocycle.

Among the results of physiological variables obtained during the three periods, we found the following significant relationships ($P < 0.05$, with a R^2 value ≥ 0.85) with running performance in the competition period (finishing time, in s): $R = 0.941$ (SEE=65.326 s; 95%CL=0.35,1.00) for $BLa@19 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (specific period); and $R = 0.958$ (SEE=55.566 s; 95%CL=0.49,1.00) for $BLa@17 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $R = 0.956$ (SEE=56.997 s; 95%CL=0.47,1.00) for $BLa@19 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, and $R = -0.949$ (SEE=61.359 s; 95%CL=-0.41,-1.00) for peak running velocity (competition period).

Multiple regression analysis indicated that the following equations of combined physiological variables obtained in each of the three testing batteries contributed to a significant increase in R^2 over the univariate relationships. These were:

First testing battery (preparatory period)

Performance time in third simulated competition (competition period), in s = ($BLa@17 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \cdot 2.099$) + (% decrease in jump height in 60sRJ $\cdot 0.074$) + ($1RM \cdot -0.004$) + 34.389
($R^2=1.000$; SEE= 0.00024 s)

Second testing battery (specific period)

Performance time in third simulated competition (competition period), in s = ($BLa@17 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \cdot 60.836$) + ($BLa@19 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \cdot 43.885$) + 1819.241 ($R^2=0.994$; SEE= 18.947 s)

Third testing battery (competition period)

Performance time in third simulated competition (competition period), in s = ($BLa@17 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \cdot 121.060$) + (% decrease in jump height in 60sRJ $\cdot 4,135$) + 2040.177 ($R^2=0.999$; SEE= 7.664)

DISCUSSION

The main finding of our study was that blood lactate values obtained at submaximal, high intensities (competition speed) during all the testing batteries performed over a training macrocycle were related with (and also predicted) actual competition in the 'target' competition (i.e, race at the end of the macrocycle) of the cross-country season. The ability to reach the lowest possible lactate values at the aforementioned speeds is associated with a higher potential for competition performance. Thus, a practical application of our investigation is that blood lactate measurements should be performed at

different times within the training macrocycle during intense, submaximal running training bouts (e.g., 'tempo' or 'competition' running training sessions) in order to monitor a runners' fitness level. This intervention can be easily programmed and performed in some training sessions with no need for additional testing procedures outside normal training drills and thus without interfering with the athletes' normal training schedule.

Keeping in mind that endurance performance is multifactorial (and this is in fact the reason why we also applied a multiple regression analysis), it appears that maximal strength determined during a 1RM squat test in the preparatory period is the only variable reflecting the ability to produce peak muscle contractions that seems to be significantly related with peak endurance performance. Our results might suggest that the ability to produce high levels of muscle strength at the start of the macrocycle might 'prepare' runners' skeletal muscles and allow them to maximize the metabolic and muscle adaptations to endurance training that occur later in the training program. Further, with the periodized, strength training program we used in the macrocycle (10), 1RM performance in the squat test consistently improved in our subjects from the start to the end of the macrocycle, reflecting that increases in maximal muscle strength do not interfere with actual improvements in endurance capacity. Finally, and while keeping in mind that most physiological determinants of endurance performance are likely to interact with each other, peak strength capacity seems to be a very important physiological variable at the start of the season whereas power maintaining abilities at submaximal workloads gradually gain an increasing importance over the duration of the macrocycle. Evidence exists on the positive influence of maximal strength training on one of the main determinants of running performance –that is, running economy (6, 17, 32, 34, 37). Since maximal strength training improves neuromuscular coordination and reduces the percent of maximal strength required for sustaining a specific muscle task, more slow and less fast motor units, respectively, are recruited after maximal strength training, resulting in improved muscle efficiency (or 'economy' in the case of running) since slow muscle fibres (type I) are more efficient, i.e., they consume less oxygen for a given load, than fast fibres (type II) (16, 24, 36). This phenomenon might explain the parallel improvements in maximal strength and mean economy observed in our runners over the macrocycle (Table 1). On the other hand, a key determinant of running economy is the ability to maintain power in fatiguing situations (that is, the ability to minimize loss of stride length over high intensity running bouts), which can be improved with specific, periodized strength training similar to the training used in the present study (10). From a practical point of view, the ability to maintain stride length as constant as possible at competition speeds can be determined with the SLS (stride length/speed) ratio (10), and index which tended to improve at the end of the macrocycle in our study. (The % improvement in this index from the start to the end of the macrocycle was closely related to the % improvement in the 1RM squat/body weight value ($R = 1.00$, data not shown)).

Our results are in agreement with most previous studies showing no significant effects of training interventions (despite considerable increases in training intensity) on the VO_{2max} of well-trained endurance athletes as runners (33), swimmers (7) and cyclists (21). It seems that, once a certain training status is reached (i.e., VO_{2max} of nearly $70 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ in the present subjects), further increases in training intensity and volume no longer are associated with improvements in VO_{2max} . In contrast, numerous studies have demonstrated by both cross-sectional and longitudinal comparisons that endurance training leads to decreased blood lactate accumulation at a given submaximal workload and that blood lactate variables are more related to performance than other variables such as VO_{2max} (39). Thus, an important adaptation to endurance training over a macrocycle that is associated with actual performance seems to be a lower reliance on anaerobic metabolism at a given workload. Further investigation might clearly elucidate the extent to which a decrease in lactate release in the blood and/or enhanced clearance is responsible for lower blood accumulation in response to training in well trained endurance athletes such as our subjects.

The aforementioned increased reliance on aerobic metabolism (i.e., type I skeletal muscle fibres) and less reliance on anaerobic metabolism (type II fibres) at submaximal workloads towards the end of the macrocycle (as reflected by lower lactate levels) was accompanied with a decrease in peak speed and peak/explosive power-related variables, e.g., maximal power, velocity at maximal power, performance in vertical jump tests. This was however accompanied by an overall trend towards an improvement in power-maintaining abilities, i.e., $\% (1RM + \text{body weight})$ at which maximal power was attained, peak velocity during the treadmill test or $\%$ loss in SLS. Other authors have found that training induces overall parallel improvements in peak levels of muscle strength, power and speed in rugby players from the start of the training season to the competition phase (1). An overall similar behaviour of peak muscle strength and power has also been described over a 50-week, power and

velocity-oriented training program in firefighters (25). One reason for the disparity between our results and those of the aforementioned studies might lie in the fact that training induced changes in power and velocity greatly depend on the specific training orientation, i.e., endurance-oriented in our study vs. much more power/velocity oriented in the studies by Baker (1) and Nacleiro *et al* (25). There seems to be a specific training adaptation in the "endurance stretch-shortening cycle" of distance runners, an ability that is not necessarily dependent on the ability to generate high levels of power at any squat load or on the ability to generate maximal speed in concentric movements. In fact, in a previous report from our group with endurance runners of a similar level, we found no improvement in sprint performance (20 m test) over a 24-week training macrocycle and a decrease in SJ performance (11).

In summary, blood lactate values obtained at submaximal, high intensities during the three testing batteries of a training macrocycle (corresponding to the preparatory, specific and competition period, respectively) were related with (and also predicted) actual competition performance in the 'target' competition of a cross-country season. The ability to reach the lowest possible lactate values at specific running speeds is associated with a higher potential for competition performance. Additionally, 1RM squat ability in the preparatory period also seems to be related with actual endurance performance at the end of the macrocycle.

PRACTICAL APPLICATIONS

Blood lactate measurements should be performed at different times over a training macrocycle during intense, submaximal running training bouts (e.g., 'tempo' or 'competition' running training sessions) in order to monitor runners' fitness levels and training progress. This intervention can be easily programmed and applied in some specific training sessions over the macrocycle (using portable lactate analysers with documented validity) with no need for additional testing batteries outside normal training drills and thus without interfering with the athletes' normal training schedule. Keeping in mind that endurance performance is multifactorial (and thus testing batteries should ideally assess the broadest possible range of physiological capabilities), assessment of strength/power related capabilities in endurance athletes should preferably focus on maximal strength determination (i.e., 1RM squat test) during the preparatory period. As opposed to speed/power sports, determination of speed/power related abilities seems to be less useful or applicable in endurance runners as these abilities would remain stable (or even decrease) over a macrocycle in the latter phases of the macrocycle despite improvements in running performance over the same period.

References

1. BAKER, D. A series of studies on the training of high intensity muscle power in rugby league football players. *J. Strength Cond. Res.* 15: 198-209, 2001.
2. BAKER, D., S. NANCE, AND M. MOORE. The load that maximizes the averages mechanical power output during jump squat in power trained athletes. *J. Strength Cond. Res.* 15: 92-97, 2001.
3. BELLI, A., AND C. BOSCO. Influence of stretch-shortening cycle on mechanical behaviour of triceps surae during hopping. *Acta Physiol. Scand.* 144: 401-408, 1992.
4. BISHOP D., D.G. JENKINS, L.T. MACKINNON, Y. MCENIER, AND M.F. CAREY. The effects of strength training on endurance performance and muscle characteristics. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31:886 - 891, 1999.
5. BOSCO, C. P. MOGNONI, AND P. LUHTANEN. Relationship between isokinetic performance and ballistic movement. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 51: 357-364, 1983.
6. BRAUN W.A., FLYNN M.G., GERTH M., AND K. SMITH. The effect of strength training on endurance run performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32(Suppl.):654, 2000.
7. COSTILL, D.L., M.G. FLYNN, J.P. KIRMAN, J.A. HOUMARD, J.B. MITCHELL, R. THOMAS, S.H. PARK. Effects of repeated days of intensified training on muscle glycogen and swimming performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 20:249-254, 1988.
8. DUGAN, E.L., T.L.A. DOYLE, B. HUMPHRIES, C.J. HASSON, AND R. U. NEWTON. Determining the optimal load for jump squats: A review of methods and calculations. *J. Strength Cond. Res.* 18:668-674, 2004.
9. ESTEVE-LANAO, J., C. FOSTER, S. SEILER, AND A. LUCIA. Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes. *J. Strength Cond. Res.* 21:943-499, 2007.
10. ESTEVE-LANAO, J., M. RHEA, S. J. FLECK AND A. LUCIA. Running specific, periodized strength training attenuates loss of step length during intense endurance running. *J. Strength Cond. Res.* (in press).
11. ESTEVE-LANAO, J., A. F. SAN JUAN, C. P. EARNEST, C. FOSTER, AND A. LUCIA. How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 37:496 - 504, 2005.
12. FOSTER, C., AND A. LUCIA. Running economy: the forgotten factor in elite performance. *Sports Med* 37:316-319, 2007.
13. GETTMAN L.R., P. WARD, AND R.D. HAGAN. A comparison of combined running and weight training with circuit weight training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 14: 229-234, 1982.
14. HAENNEL, R., K.K. TEO, A. QUINNEY, AND T. KAPPAGODA. Effects of hydraulic circuit training on cardiovascular function. *Med. Sci. Sports Exerc.* 21:605 - 612, 1989.
15. HICKSON R.C., B.A. DVORAK, AND E.M. GOROSTIAGA. Potential for strength and endurance to amplify endurance performance. *J. Appl. Physiol.* 65: 2285 - 2290, 1988.
16. HOFF J., J. HELGERUD, AND U. WISLOFF. Maximal strength training improves work economy in trained female cross-country skiers. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31:870 - 877, 1999.
17. JOHNSTON R.E., T.J. QUINN, R. KERTZER, AND N.B. VROMAN. Strength Training in female distance runners: Impact on running economy. *J. Strength and Cond. Res.* 11:224 - 229, 1997.
18. KAIKKONEN H., M. YRJAMA, E. SILJANDER, P. BYMAN, AND R. LAUKKANEN. The effect of heart rate controlled low resistance circuit weight training and endurance on maximal aerobic power in sedentary adults. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 10:211 - 215, 2000.
19. LESUER, D.A., J. H. MCCORMICK, J. L. MAYHEW, R. L. WASSERSTEIN, AND D.M. ARNOLD. The accuracy of seven prediction for estimating 1-RM performance in the bench press, squat, and deadlift. *J. Strength Cond. Res.* 11: 211-213, 1997.
20. LUCIA, A., J. ESTEVE-LANAO, J. OLIVÁN, F. GÓMEZ-GALLEGO, A. F. SAN JUAN, C. SANTIAGO, M. PÉREZ, C. CHAMORRO, AND C. FOSTER. Physiological characteristics of the best Eritrean runners—exceptional running economy. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 31: 530-540, 2006.
21. LUCIA, A., J. HOYOS, J. PARDO, AND J.L. CHICHARRO. Metabolic and neuromuscular adaptations to endurance training in professional cyclists: a longitudinal study. *Jpn J. Physiol.* 50: 381-388, 2000.

22. LUCIA, A., J. HOYOS, M. PEREZ, and J.L. CHICHARRO. Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32:1777-1782, 2000.
23. MC CARTHY J.P., J. AGRE, B. GRAF, M. POZNIAK, AND A. VAILAS. Compatibility of adaptive responses with combining strength and endurance training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 27:429 - 436, 1995.
24. MILLET G.P., JAOUEN B., BORRANI F., AND R. CANDAU. Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and VO₂ kinetics. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34: 1351 - 1359, 2002.
25. NACLERIO, F., D. FORTE, J.C. COLADO, J. BENAVENT AND I. CHULVI, I Analysis of the force and power produced in the squat over 52 weeks training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 39 (Suppl.): S293, 2007.
26. NICHOLSON R.M., AND G.G SLEIVERT. Impact of concurrent resistance and endurance training upon distance running performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31(Suppl.): 1559, 1999.
27. NOAKES T.D., MYBURGH K.H., AND R. SCHALL. Peak treadmill running velocity during the VO₂ max test predicts running performance. *J. Sports Sci.* 8:35 - 45, 1990.
28. PAAVOLAINEN, L., K. HÄKKINEN, I. HÄMÄLÄINEN, A. NUMMELA, AND H. RUSKO. Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J. Appl. Physiol.* 86:1527 - 1533, 1999.
29. PAAVOLAINEN, L., K. HAKKINEN, AND H. RUSKO. Effects of explosive type strength training on physical performance characteristics in cross-country skiers. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 62:251 - 255, 1991.
30. PLISK, S.S. AND M. H. STONE. Periodization Strategies. *Strength Cond J* 25:19 - 37, 2003.
31. PUGH, L.G. Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance. *J. Physiol.* 207: 823-835, 1970.
32. SAUNDERS, P.U., D.B. PYNE, R.D. TELFORD, E.M. PELTOLA, R.B. CUNNINGHAM, AND J.A. HAWLEY. Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *J. Strength Cond. Res.* 20:947-954, 2006.
33. SJODIN, B., I. JACOB, AND J. SVEDENHAG. Changes in onset of blood lactate accumulation (OBLA) and muscles enzymes after training at OBLA. *Eur. J. Appl. Physiol.* 49:45-57, 1982.
34. SPURRS, R.W., A.J. MURPHY, AND M.L. WATSFORD. The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 89:1 - 7, 2003.
35. STONE M.H., G.D. WILSON, D. BLESSING D., AND R. ROZENEK. Cardiovascular responses to short-term Olympic style weight-training in young men. *Can. J. Appl. Sport Sci.* 8:134 - 139, 1983.
36. TANAKA H., AND T. SWENSEN. Impact of resistance training on endurance performance. A new form of cross-training? *Sports Med.* 25:191 - 200, 1998.
37. TURNER A.M., J.M. OWINGS, AND J.A. SCHWANE. Six weeks of plyometric training improves running economy. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31(Suppl.): 1556, 1999.
38. WATHAN, D. Load assignment. In: *Essentials of Strength Training and Conditioning.* T.R. Baechle, ed. Champaign, IL: Human Kinetics, 1994. pp. 435-439.
39. WELTMAN, A. (Ed.). *The blood lactate response to exercise.* Human Kinetics, Champaign, IL, 1995.

Table 1. Results (mean±SD) of the three testing batteries performed over the macrocycle.

Test	Variable	1 st Test (Preparatory Period)	2 nd Test (Specific Period)	3 rd Test (Competition Period)
Anthropometry	Body weight (kg)	68.0±3.7	67.4±3.3	66.3±3.9 †
	BMI (kg·m ⁻²)	22.6±1.3	22.3±1.2	22.0±1.0
	Sum of 6 skinfolds (mm)	61±12	57±15	53±13 †
Vertical jump tests	Height in SJ (cm)	32.6±2.0	30.9±2.3	28.9±2.7 **, †
	Height in CMJ (cm)	31.9±4.5	32.1±3.1	29.8±3.6
	60 s RJ: % decrease in jump height, initial 10 vs. last 10 jumps	-4.6±9.4	-0.7±5.4	-5.2±12.5
	60 s RJ: % decrease in contact time, initial 10 vs. last 10 jumps	8.0±6.6	0.1±8.1	7.2±9.5
100 m running stride test	Step number x time (s)	723±101	735±65	714±79
Power Squat test	Maximal power (W)	1224±166	1119±128	1055±120 **, †
	Maximal load (kg+BW) at which maximal power is attained	118.1±9.6	115.3±6.2	142.3±10.6 **†
	% of (1RM+BW) at which maximal power is attained	57.6±8.1	52.5±6.3*	61.2±8.5 **, †
	velocity at maximal power (m·s ⁻¹)	0.90±0.09	0.83±0.07	0.66±0.03 **, †
Maximal Strength test (Squat)	1RM squat (kg)	138.9±16.0	154.5±19.7*	167.8±31.0 †
	1RM squat (kg) + body weight (kg)	207.0± 19.5	221.8±23.4	234.1±34.1 †
	1RM· kg body weight ⁻¹	2.0±0.2	2.3±0.2*	2.5±0.3 †
Maximal frequency tests	steps·s ⁻¹	4.5±0.1	4.6±0.2	4.5±0.2
Constant-speed treadmill tests	VO ₂ @14 km·h ⁻¹ (ml ⁻¹ ·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	47.2±1.0	46.2±1.9	45.0±2.9
	VO ₂ @17 km·h ⁻¹ (ml ⁻¹ ·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	56.8±2.0	55.5±3.4	53.8±3.0
	VO ₂ @19 km·h ⁻¹ (ml ⁻¹ ·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	63.4±3.2	62.3±2.7	60.1±2.6 †
	BLa@14 km·h ⁻¹ (mmol·l ⁻¹)	2.4±1.4	1.8±0.8	1.6±0.3
	BLa@17 km·h ⁻¹ (mmol·l ⁻¹)	5.6±2.6	3.8±1.2	4.0±1.5
	BLa@19 km·h ⁻¹ (mmol·l ⁻¹)	9.7±2.8	8.7±2.4	9.7±4.0
	'Mean' economy (ml O ₂ ·kg ⁻¹ ·km ⁻¹)	202±4	197±8	191±10 †
	VO ₂ max (ml ⁻¹ ·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	68.0±5.6	68.7±6.3	66.0±5.0
Graded treadmill tests	Peak velocity (km·h ⁻¹)	20.3±0.8	21.0±1.1*	20.8±0.8
	Time limit at peak velocity	3min59s±45s	3min39s±48s	3min52s±41s
	% loss in SLS (stride length (cm)/speed (m·s ⁻¹))	-0.9±1.2	-1.6±1.6	0.2±1.5
Tests at peak velocity				
Simulated cross country Competition	Performance time	44min22s±2min32s	41min54s±2min0s*	41min43s±2min48s†

Footnote for Table 1. * $P < 0.05$ for 1st vs. 2nd test; ** $P < 0.05$ for 2nd vs. 3rd test; † $P < 0.05$ for 1st vs. 3rd test. Abbreviations: SJ (squat jumps), CMJ (counter-movement jumps), 60 s RJ (sixty-second repeated-jumps), BW (body weight), BLa (blood lactate), SLS (stride length/speed).

Figure 1. Main characteristics of the study design: training macrocycle and testing schedule.

Abbreviations: XC (cross-country race), R (road race).

	MACROCYCLE																						
PERIOD	Preparatory									Specific						Competitive							
MESOCYCLE	I			II			III			IV			V			VI							
COMPETITIONS										XC		XC		R		R		XC		XC		XC	
TESTING BATTERY																							
SIMULATED COMPETITION																							

Figure 2. Main training characteristics in each mesocycle over the study period (macrocycle).

	PERIOD	Preparatory			Specific		Competition
	MESOCYCLE	I	II	III	IV	V	VI
ENDURANCE	general	Zone 1	Zone 2	Fartlek	Zones 2-3	Zone 3	Peak velocity
	specific	Zone 2	Fartlek	Zones 2-3	Zone 3	Peak Velocity	Anaerobic Capacity
	next specific (last week)	Fartlek	Zones 2-3	Zone 3		Anaerobic Capacity	-
STRENGTH	basic	low intensity (50-60% 1RM)	maximal (70-80% 1RM)	maximal (85-90% 1RM)	power (60-50% 1RM)	power in fatigue	low intensity (60-70% 1RM)
	general	circuit training	circuit training with light loads	50m Oregon circuit with light loads	100m Oregon / intermittent plyometrics	intermittent plyometrics	-
	specific	body weight	hills	vests (Zones 2-3)	vests (Zone 3)	hills, mud	-

Figure 3. Subjects' mean(\pm SD) weekly running volume and weekly total running load (i.e., TRIMP (*training impulse*) score). See text for explanation of the modified TRIMP score.

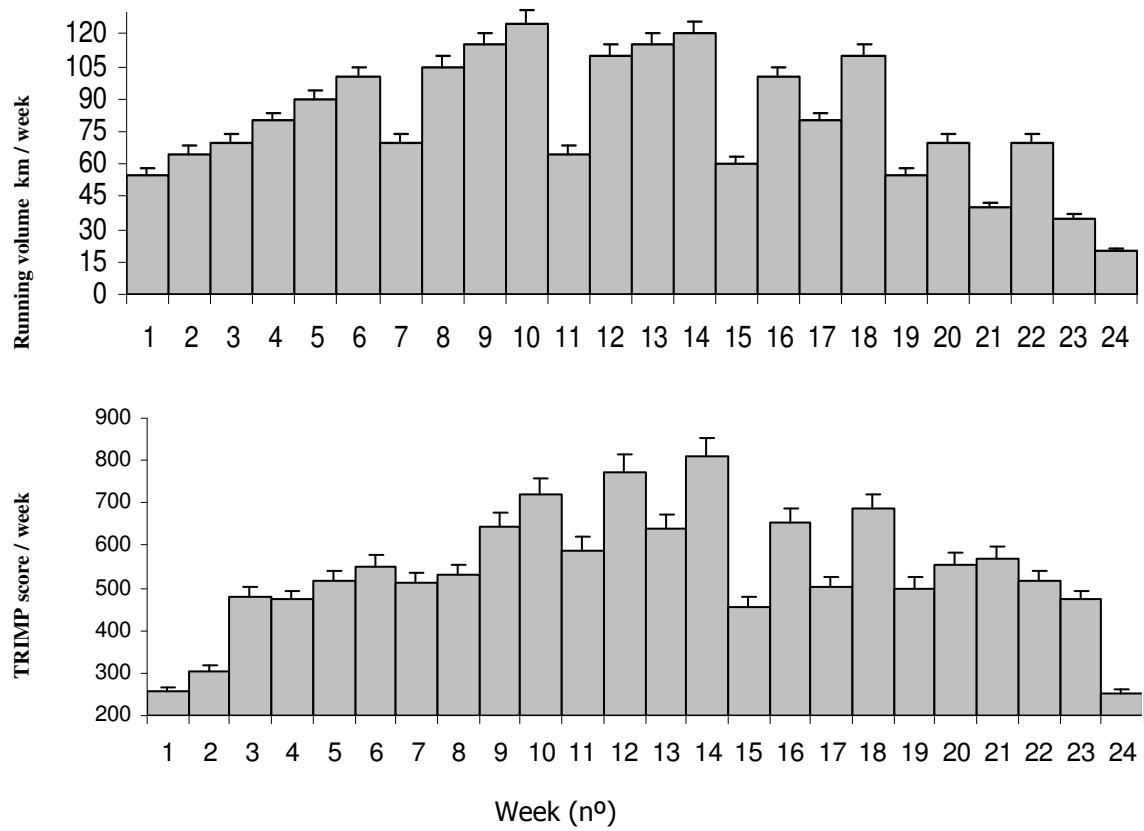


Figure 4.- Schedule of the two-week testing battery in the three evaluations.

	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
1st week	Anthropometry Vertical Jump tests	Max frequency test Graded treadmill test	Easy run (60 min) + stretching	1) 100 m running stride test 2) Power squat test	Rest day	Easy run (30 min) + stretching	Competition (except in the preparatory period)
2nd week	Easy run (30 min) + stretching	Squat test (1RM) Tests at peak velocity	Easy run (60 min) + stretching	Constant-speed running tests	Rest day	Easy run (30 min) + stretching	Simulated Competition

4.- Discusión General y Conclusiones

Dado que en cada estudio se ha desarrollado ya una discusión con una orientación amplia y aplicada de los resultados obtenidos, en este apartado realizamos una discusión de carácter general, englobando las principales conclusiones, así como las principales limitaciones de nuestros trabajos.

La principal limitación de los mismos radica en el escaso número de sujetos que completaron los estudios. Estos fueron 8, 12, 18 y 7, respectivamente, en los estudios 1, 2, 3 y 4. En primer lugar, es difícil realizar estudios longitudinales de entrenamiento, controlando directamente el proceso. Los motivos son varios: desde las posibilidades del investigador en cuanto a diseñar programas sobre grupos no entrenados directamente por él mismo a la participación de los sujetos, seguimiento del programa o aceptación de procesos experimentales en un proceso longitudinal del que van a depender resultados deportivos. Como muestra de esta dificultad, apenas existen trabajos descriptivos de más de 8 semanas en la literatura, y son muy escasos los trabajos experimentales.

Estos problemas se amplifican cuando los sujetos sobre los que se pretende investigar son de cierto nivel competitivo. En nuestro caso esto ha sido posible tanto porque el investigador es el entrenador personal de los sujetos, como por la buena disposición de los mismos a participar en este tipo de trabajos desde hace años, algo que, sin embargo, tampoco ha sido fácil, dada la poca costumbre en este deporte y en el general de los deportistas a prestarse a experimentación y control férreo del entrenamiento. El investigador ha diseñado el entrenamiento, acompañado y controlado a los sujetos en todo el proceso de entrenamiento y competición durante todo este tiempo, con no pocas dificultades.

En segundo lugar, a esta complejidad metodológica de los trabajos se le unía la vocación de entrenador del investigador principal en cuanto a que dicho esfuerzo produjera respuestas sobre las incógnitas planteadas. Ante todo, su voluntad fue la

de dar respuesta a cuestiones planteadas sobre la periodización del entrenamiento, y de esa manera poder mejorar sus programas de cara al futuro.

Consciente del riesgo de que algunos atletas mejorasen en una temporada menos que otros, se entendía que dicho sacrificio valía la pena de cara a temporadas posteriores. Ajenos a este hecho, y por ello a la necesidad de un cumplimiento estricto del proceso, algunos atletas no cumplieron con los férreos criterios de inclusión en el análisis de resultados. Esto debía ser así para obtener resultados creíbles y útiles para los entrenadores después de semejante dificultad de seguimiento. Se une este hecho al nivel de los sujetos, que deportivamente podemos clasificar como de "alto nivel regional" pero que fisiológicamente pueden incluso considerarse como "muy entrenados". Corredores de mayor nivel no se han prestado hasta la fecha para trabajos experimentales de intervención (es decir, alterando sus cargas de entrenamiento con fines científicos) y menos aún de tan larga duración.

Podemos asegurar, con total honestidad, que la voluntad del investigador ha sido la de ser estricto para aceptar o excluir a sujetos respecto a los criterios de inclusión.

Creemos que los resultados tienen aplicación desde el punto de vista del entrenamiento, al menos en sujetos de este nivel. Los resultados obtenidos, además, muestran diferencias significativas tanto en la aplicación de un modelo u otro de periodización de la resistencia y de la fuerza como en el control de las diversas variables que influyen en el rendimiento. El rendimiento, a diferencia con otros estudios, se ha evaluado con resultados de competición, en el máximo momento de forma del macrociclo, o a final del mismo a velocidades de competición.

El primer objetivo de la presente Tesis Doctoral fue comparar el efecto de modificar la distribución natural de la carga de entrenamiento en relación al modelo trifásico sobre el rendimiento en competición. El estudio 1 sirvió de base descriptiva sobre la que desarrollar, una temporada después, dos modelos más

extremados, bien hacia la *polarización*, bien hacia un mayor énfasis en la zona 2 respecto a lo que había sido la distribución natural en la temporada previa. Esta distribución "natural" del estudio 1 fue de 71/21/8%, respectivamente, en zonas 1/2/3. y resultó muy similar a lo hallado previamente en ciclistas profesionales o patinadores de velocidad (Lucía et al 2003, Lucía et al 2000, Lucía et al 1999, Foster et al 1996). Pese a que los ciclistas de Lucía y colaboradores fueron estudiados en vueltas por etapas de 3 semanas y nuestros corredores durante 24 semanas de preparación, las puntuaciones TRIMP totales pueden dar una pista para entender por qué mostraron una distribución tan parecida. Curiosamente, una Vuelta a España resultó suponer ~6700 TRIMPS, y un Tour de Francia ~7112 (promedio por tanto ~6900) (Lucía et al 2003). En 19 semanas de entrenamiento, nuestros corredores acumularon 6927 TRIMPS. La proporción es de 6:1, es decir, que un ciclista profesional realiza en una semana la misma carga de entrenamiento que nuestros corredores en 6 semanas de aquella temporada. La dureza de una vuelta por etapas es tal que por ello y por otros factores propios del ciclismo (comentados en el apartado 1.11) no es posible acumular la mayor parte del tiempo entre las zonas 2 y 3.

En el estudio 2 los sujetos soportaron una mayor carga total, pero de nuevo los grupos fueron incapaces de superar el 8% del total del entrenamiento en zona 3, pese a que originalmente se diseñó para que acumulasen un 13 y un 10%, respectivamente, en el grupo polarizado y no polarizado. Parece, en general, que existe un límite de acumulación de entrenamiento en zona 3, posiblemente alrededor del ~8% (y siempre $\leq 10\%$) del tiempo total de todos los esfuerzos de entrenamiento, aunque luego una competición de campo a través se desarrolle un 90% o más del tiempo en zona 3 (Esteve-Lanao et al 2007, Esteve-Lanao et al 2005).

Con la forma de cuantificación que no incluye los minutos de calentamiento y vuelta a la calma de las sesiones ("*session goal approach*"), nuestros corredores polarizados del estudio 2 y los esquiadores de fondo de

Seiler y Kjerland (2006) mostraron que una distribución 74/11/15 y 75/8/17 respectivamente.

Este patrón, ahora comprobado, proviene de la observación de algunos trabajos descriptivos en deportistas de resistencia de elite de varias disciplinas, como remeros (Fiskestrand y Seiler 2004, Steinacker et al 1998, Steinacker 1993), esquiadores de fondo (Seiler y Kjerland 2006), ciclistas de pista de persecución (Schumacker y Mueller 2002) o maratonianos (Billat et al 2001).

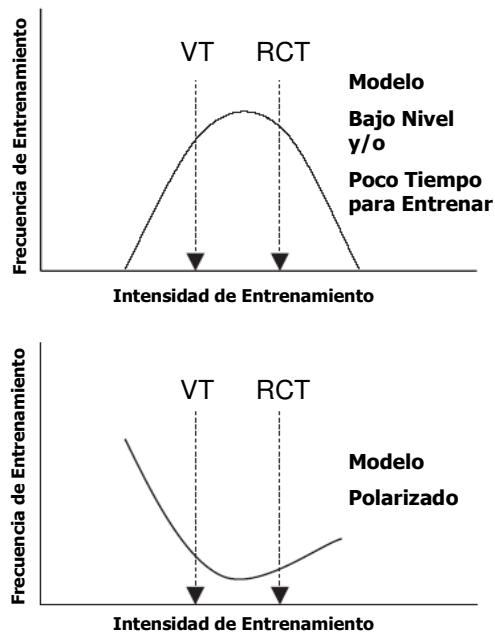
La explicación fisiológica actual al respecto de que exista un límite máximo de la cantidad de ejercicio de alta intensidad que pueda ser tolerado se relaciona con el riesgo de regulación *a la baja* (*down-regulation*) del sistema nervioso simpático, tal como se ha explicado con mayor detalle en las discusiones de los estudios 1 y 2.

La propuesta de Hoff (2006) sobre bloques de trabajo exclusivo en zona 3 (apartados 1.7, 1.10) se opone aparentemente a la predominancia del trabajo extensivo, aunque dichos bloques concentrados también se alternan con trabajo "tradicional", y por tanto podríamos decir que hacen un "polarizado inverso", o al menos una proporción más compensada entre el total empleado en zonas 1 y 3.

Es destacable, sin embargo, el hallazgo de nuestro estudio 1 en cuanto a que la variable de mayor peso en la predicción del rendimiento fuera la acumulación de minutos en zona 1 ($r=0,97$ para la relación entre esta variable y el rendimiento). Aunque este dato no mostró tanta relación directa en el estudio 2, sin embargo, fueron los corredores del grupo polarizado los que más mejoraron su rendimiento, recalando de nuevo la importancia del entrenamiento ligero. Dicho entrenamiento "ligero", en corredores de alto nivel, supone correr a un ritmo de menos de cuatro minutos por kilómetro (para el mejor de nuestros sujetos alrededor de 3 min 40 s), por lo que acumular altos volúmenes de dicho estrés cardiovascular parece ser suficiente estímulo para ese tipo de sujetos a nivel mitocondrial, de capilarización, de aumento del volumen plasmático y de la eficiencia metabólica de las fibras lentas y de la función cardiorrespiratoria, tal como se sugiere en la discusión de los estudios 1 y 2.

De estos estudios se desprende una recomendación general. Si el nivel de los sujetos es medio-bajo y disponen de poco tiempo para entrenar, lo mejor es acumular la mayor parte del total de los entrenamientos en zona 2. Esto parece justificado por las recomendaciones del Colegio Americano de Medicina del Deporte (ACSM), vigentes desde 1998 y basadas en un gran número de trabajos científicos. Nuestro estudio aporta una recomendación añadida para aquellos que dispongan de tiempo suficiente para entrenar y hayan alcanzado ya cierto nivel de rendimiento (al menos alto nivel regional), de modo que es preferible una aproximación polarizada entre zonas 1 y 3, con mínima acumulación de entrenamiento en zona 2 (ver figura 4.1).

Figura 4.1
Modelos propuestos sobre la distribución óptima de la intensidades según la frecuencia de entrenamiento (adaptado de Seiler y Kjerland 2006)



Para atletas de ese nivel alto o superior, que sin embargo no dispongan de mucho tiempo para entrenar, parece, según todo ello, que lo óptimo puede ser entrenar mayoritariamente en zonas 1 y 3. El riesgo y limitaciones para el rendimiento, tanto en ellos como en los polarizados, parece relacionado con la regulación a la baja del sistema nervioso simpático.

Los estudios 3 y 4 demuestran la importancia del entrenamiento de fuerza en la capacidad de mantener un estilo estable de carrera en presencia de fatiga, así como el efecto favorable sobre el rendimiento en competición. Se ha aportado un sencillo índice para medir el mantenimiento de la zancada en relación a la velocidad ("*SLS*"), que permite evaluar la eficacia de la periodización del entrenamiento de fuerza sobre la habilidad específica de la carrera en fatiga a velocidades de competición (estudio 3). Éste índice se ha mostrado muy dependiente del tipo de periodización desarrollado (estudio 3) y del desarrollo de la fuerza máxima (estudio 4). No se utilizó este índice en competición por las dificultades técnicas que conlleva, hasta el momento, su registro.

Por una parte, es difícil determinar el *SLS* porque por otro medio que no sea el de filmación, utilizado por nosotros. Hoy día se han empezado a comercializar monitores de ritmo cardiaco que incluyen sensores de registro de la velocidad y la frecuencia de ciclo al mismo tiempo. Esto abre nuevas dimensiones para el registro y utilización del citado índice en competición. En el momento de la realización del estudio 3 no se disponía de dichos medios, y apenas existían propuestas para la evaluación de la carrera, aunque los dispositivos con acelerómetros están comercializados desde los años noventa, pero especialmente para la marcha (Jakicic et al 1999, Nichols et al 1999, Auvinet et al 1999).

El gran desarrollo de la tecnología GPS en los últimos años también colaborará a producir instrumentos que aúnen ambos sistemas y permitan, en breve, registros precisos, como los logrados en la biomecánica deportiva hasta el momento con vídeo o cine.

No medimos dicha variable en competición de pista de mediofondo porque los corredores en muchas ocasiones corren muy agrupados, lo que dificulta mucho la precisión del registro, o bien se realizan carreras tácticas, donde la fatiga no es igual que en pruebas que se desarrollan íntegramente a ritmos exigentes que se aproximan o mejoran las marcas personales. Estas mediciones, sin embargo, sí las hemos realizado de forma empírica para controlar el entrenamiento de nuestros

corredores, o en el test de tiempo límite a velocidad pico del estudio 4.

En el estudio 4 las competiciones simuladas eran de campo a través. Esto añade la dificultad de que el terreno no es regular, por lo que la medición debería realizarse para todos en el mismo punto, dando sucesivas vueltas para pasar por el mismo, y aún así conforme los corredores volvieran a pisar el terreno, de tierra o césped y a menudo húmedo o embarrado, la superficie se modificaría, pudiendo alterar los tiempos de contacto y el ciclo general de la zancada.

La filosofía de la periodización de la fuerza propuesta para las carreras de fondo en la presente tesis doctoral se resume en los siguientes criterios: desarrollo gradual de la fuerza máxima y resistencia a la potencia máxima en ejercicios auxiliares, y paralelamente uso de ejercicios progresivamente más específicos a intensidades metabólicas que preparen el organismo para desarrollar luego las necesidades específicas de fuerza en la intensidad correspondiente durante el ejercicio de carrera a pie.

El estudio 3 demuestra por primera vez en deportes de resistencia el beneficio de los programas periodizados sobre los no periodizados. El estudio 4 aporta, por una parte, niveles de referencia que pueden ser útiles a otros entrenadores de cara al control del entrenamiento, a sabiendas de que las mejoras obtenidas en el rendimiento en competición durante dicha preparación fueron importantes (5-6%).

A tenor de los datos obtenidos en los estudios 1 y 4, parece que la mayoría de las variables de tipo explosivo no se relacionan con el rendimiento, o en todo caso lo hacen de forma inversa (como la capacidad de salto en general). Esto no significa que no sea necesario un desarrollo previo de la velocidad o la fuerza explosiva de cara a tener un amplio margen respecto a las necesidades competitivas. Por ejemplo, que un atleta pueda correr muy rápido en distancias inferiores parece que influirá positivamente en su rendimiento (apartado 1.3), y esto posiblemente dependa a su vez de su máxima velocidad y potencia anaeróbica. De hecho, todos los corredores de los estudios 1 y 4 de campo a través

competían exclusivamente en pruebas de pista en las temporadas de aire libre.

Trabajos de otros autores sobre distancias de 5 km sí han hallado relaciones entre el rendimiento en carrera y los resultados de algunos tests de tipo explosivo o potencia anaeróbica glucolítica (Nummela et al 2006, Paavolainen et al 1999). Este último tipo de test no se realizó en nuestro estudio, pero en general, los estudios de esta tesis doctoral parecen indicar que en la larga distancia mejorar las acciones que se miden en uno o pocos movimientos, mas allá de ciertos niveles, no aportan ventajas al rendimiento. De hecho diversas variables de este tipo se mantienen estables o empeoran a lo largo de toda la temporada.

La aportación más destacada del estudio 4, sin embargo, es la de mostrar qué variables se relacionan con el rendimiento a lo largo de la temporada, en sus tres períodos (preparatorio, específico y competitivo). En este sentido, de forma general, un resultado de utilidad práctica es el haber hallado que los niveles de lactato a velocidades constantes (17 y 19 km·h⁻¹) son claves para el pronóstico. Los bajos niveles de lactato a intensidad submáxima, que recordemos se situaban alrededor del umbral anaeróbico, mostraron una influencia constante sobre el rendimiento durante toda la temporada, siendo el factor más determinante. La fuerza máxima dinámica concéntrica (en kg externos en 1RM en ½ sentadilla) del estudio 4 mejoró un 25% a lo largo de toda la temporada, y aún formando parte de uno de los modelos de regresión para pronosticar el rendimiento, su efecto sobre la marca fue mucho menor que el del lactato.

En el apartado de la introducción referido a la periodización (1.10), señalábamos el hecho de que las diferencias en el rendimiento de un 1-2% tienen una gran repercusión en los logros deportivos (Rowbottom 2000). Como ejemplo, pese a la espectacularidad del registro, la mejora del reciente récord mundial masculino de maratón de Gebreselassie, a 30 de septiembre de 2007, fue únicamente de un 0,39% sobre el anterior registro de Paul Tergat.

Las mejoras del rendimiento en el estudio 2 fueron de 5% en el grupo polarizado y 3%

en el no polarizado, respectivamente: es decir, una diferencia en la mejora entre ambos grupos del 2%. Las diferencias en el otro estudio experimental en el índice *SLS*, oscilaron entre 1,2 y -0,4% (un 29% de diferencia).

Por todo ello, parece claro que la periodización sigue siendo un aspecto clave para el logro del rendimiento máximo de los deportistas. Esta tesis doctoral contribuye a demostrar científicamente este hecho.

Sin embargo, en ningún momento pretendemos sugerir que existe un solo modelo ideal de periodización de las variables. De acuerdo con el principio de individualización, puede existir otras formas idóneas para determinados sujetos, pues nos hemos centrado en determinadas variables.

En resumen, el espíritu de esta tesis va más allá de los datos puntuales hallados en un grupo muy reducido de sujetos, y destaca con sus estudios que la periodización y control del entrenamiento son aspectos cruciales que tienen efecto a largo plazo en el rendimiento obtenido.

Las principales conclusiones a las que hemos llegado, en respuesta a los objetivos propuestos en esta Tesis Doctoral, son las siguientes:

1- En el entrenamiento de resistencia de los corredores de fondo estudiados predominaba la baja intensidad, que se relacionó con el rendimiento en competición de campo a través. La distribución polarizada de la carga de entrenamiento durante una temporada produce mayores mejoras que una distribución con mayor énfasis en la zona 2.

2- El entrenamiento periodizado de la fuerza, según los criterios expuestos en el estudio 3, muestra mayores beneficios en la capacidad para mantener un estilo estable de carrera a velocidades de competición en presencia de fatiga.

3- El entrenamiento periodizado de fuerza parece tener un efecto favorable sobre el rendimiento en competición, que principalmente viene determinado por la capacidad para generar menores niveles de lactato a velocidades cercanas a la competición.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ESTE APARTADO:

American College of Sports Medicine. Position Stand: The recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory and muscular fitness, and flexibility in healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:975-991.

Auvinet B, Chaleil D, Barrey E. Analyse de la marche humaine dans une pratique hospitalière par une méthode accélérométrique. *Rev Rhum* 1999;66:447-457.

Billat VL, Demarle A, Slawinski J, Paiva M, Korzstein JP. Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:2089-2097.

Esteve-Lanao J, Seiler S, Foster C, Lucía A. Impact of training distribution on endurance performance. *J Strength Cond Res* 2007; 21,943-949.

Esteve-Lanao J, San Juan AF, Earnest CP, Foster C, Lucía A. How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Med Sci Sports Exerc* 2005;37:496-504.

Fiskestrand A, Seiler KS. Training and performance characteristics among Norwegian international elite rowers 1970-2001. *Scand J Med Sci Sports* 2004;14:303-310.

Foster C, Daines E, Hector L, Snyder AC. Athletic performance in relation to training load. *Wis Med J* 1996;95:370-374.

Hoff J. Comunicación personal. International Conference on Strength Training, Odense 2006.

Jakicic JM, Winters C, Lagally K. The accuracy of the TriTrac-R3D accelerometer to estimate energy expenditure. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:747-754.

Lucía A, Hoyos J, Carvajal A, Chicharro JL. Heart rate response to professional road cycling: The Tour de France. *Int J Sports Med* 1999;20:167-172.

Lucía A, Hoyos J, Pardo J, Chicharro JL. Metabolic and neuromuscular adaptations to endurance training in professional cyclists: A longitudinal study. *Jpn J Physiol* 2000;50:381-388.

Lucía A, Hoyos J, Santalla A, Earnest C, Chicharro JL. Tour de France vs Vuelta a España: Which is harder? *Med Sci Sports Exerc* 2003;35:872-878.

Nichols JF, Morgan JA, Sarkin JF. Validity, reliability, and calibration of the Tritrac accelerometer as a measure of physical activity. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:908-912.

Nummela AT, Paavolainen LM, Sharwood KA, Lambert MI, Noakes TD, Rusko HK. Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. *Eur J Appl Physiol* 2006;97:1-8.

Paavolainen L, Häkkinen K, Hämmäläinen I, Nummela A, Rusko H. Explosive-strength training improves 5-Km running time by

improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol* 1999;86:1527-1533.

Rowbottom DG. Periodization of Training. EN: Garret WE, Kierkendall DT. Exercise and Sport Sciences, pp. 499-512. Lippincott, Williams & Wilkins, Philadelphia 2000.

Seiler KS, Kjerland GØ. Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an "optimal" distribution? *Scand J Med Sci Sports* 2006;16:49-56.

Schumacker YO, Mueller P. The 4000-m team pursuit cycling world record: Theoretical and practical aspects. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:1029-1036.

Steinacker JM, Lormes W, Lehmann M, Altenburg D. Training of rowers before world championships. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:1158-1163.

Steinacker JM. Physiological aspects of training in rowing. *Int J Sports Med* 1993;14Suppl 1:S3-S10.