

Un programa de entrenamiento intenso para un rápido mejoramiento tanto del metabolismo aeróbico como del anaeróbico

GIL RODAS*, JOSEP L. VENTURA,
JOAN A. CADEFAU, ROSER CUSSÓ
& JOAN PARRA

Departamento de Ciencias
Fisiológicas I. Facultad de Medicina,
Universidad de Barcelona.

* Centro de Estudios de Alto
Rendimiento Deportivo (CEARE)
Esplugues de Llobregat, Barcelona.

CORRESPONDENCIA:

Dr. Gil Rodas Font
Gran Via de les Corts Catalanes 774, 2º
08013 Barcelona
e-mail: grodas@excelent.es

RESUMEN: El objetivo de este estudio fue valorar los cambios en el metabolismo aeróbico y anaeróbico producidos por un nuevo programa de entrenamiento de corta duración. Cinco voluntarios (hombres) entrenaron diariamente durante 2 semanas en un cicloergómetro. Las sesiones consistieron en series de 15-s de esfuerzo máximo en cicloergómetro con 45-s de descanso, seguidas por series de 30-s de esfuerzo máximo con 12-min de descanso. El número de series fue gradualmente aumentado hasta un máximo de siete. Fueron efectuadas biopsias musculares en el *vastus lateralis* antes y después del entrenamiento. Las variaciones de rendimiento se evaluaron mediante dos tests, uno de esfuerzo máximo de 30-s y un test de esfuerzo máximo progresivo. Como respuesta al entrenamiento, se encontraron aumentos significativos en la concentración de fosfocreatina (31%) y glucógeno (32%). Además, se observó un aumento significativo en la actividad muscular de los enzimas: creatin-quinasa (44%), fosfofructoquinasa (106%), lactato deshidrogenasa (45%), 3-hidroxi-acil-CoA deshidrogenasa (60%) y citrato sintetasa (38%). Después del entrenamiento, el rendimiento en el test de esfuerzo máximo de 30-s no mostró mejora significativa, mientras que en el test de esfuerzo progresivo, el consumo máximo de oxígeno aumentó de 57,3 ($\pm 2,6$) ml·min⁻¹·kg⁻¹ a 68,3 ($\pm 3,9$) ml·min⁻¹·kg⁻¹, y la carga muscular máxima pasó de 300 (± 11) W a 330 (± 21) W; siendo todas las variaciones significativas. En conclusión, este nuevo protocolo en el que se utilizan períodos de entrenamiento de corta duración, altas cargas y largos períodos de recuperación, parece ser un programa efectivo para el mejoramiento del rendimiento y de las vías energéticas en un corto período de tiempo.

PALABRAS CLAVE: músculo esquelético humano, enzimas oxidativas, consumo de oxígeno, rendimiento anaeróbico, lactato.

SUMMARY. The target of this study is to assess the changes, in both the aerobic and anaerobic metabolisms, provoked by a short length program training. Five (male) volunteers worked out daily during two weeks in a cycloergometer. These sessions consisted of 15-second series of maximum effort with a 12-minute rest. The number of series increased gradually up to seven. Muscular biopsies in the *vastus lateralis* were done before and after the training. Performance variations were valued using two tests: a 30-second maximum effort test, and a progressive maximum effort test. Important increases in the phosphocreatin concentration (31%) and glucogen (32%) were found. An important increase in the muscular activity of the enzymes was also found: creatin kinase (44%), phosphofructokinase (106%), lactate deshydrogenase (45%), 3-hydroxi-aci-CoA deshydrogenase (60%) and citrate-synthetase (38%). After training, the performance in the 30-second maximum effort test did not show any significant improvement. However, in the progressive maximum effort test, the oxygen maximum consumption increased from 57,3 ($\pm 2,6$) ml·min⁻¹·kg⁻¹ to 68,3 ($\pm 3,9$) ml·min⁻¹·kg⁻¹, and the maximum muscular load went from 300 (± 11) W to 330 (± 21) W, being all the variations significant.

As a conclusion, this new protocol, which uses short length training periods, important loads and long recovery periods, is an effective program to improve the performance and the energy in a short period of time.

KEY WORDS: human skeletal muscle, oxidative enzymes, oxygen consumption, anaerobic performance, lactate.

INTRODUCCION

Es aceptado por la bibliografía internacional que las variaciones inducidas por el ejercicio pueden ser moduladas según el programa de entrenamiento (Abernethy y col. 1990). De esta forma tenemos que un protocolo con ejercicios de resistencia produce mayor adaptación del metabolismo aeróbico (enzimas de la vía oxidativa), mejora la captación de oxígeno (VO_2) y el rendimiento en tests de resistencia (Henriksson, 1996), mientras que entrenamientos rápidos y cortos aumentan la concentración de sustratos y la actividad de enzimas relacionados con el metabolismo anaeróbico (Thorstensson y col. 1975, Roberts y col. 1982; Cadefau y col. 1990). En contrapartida a estos extremos, en la mayoría de los casos, el objetivo de la preparación de un deportista es mejorar tanto sus características aeróbicas como las anaeróbicas. Generalmente, para obtener este resultado, se diseña una fase inicial de resistencia, seguida por ejercicios de alta intensidad o rápidos y cortos.

En la literatura encontramos que los programas de entrenamiento capaces de mejorar el metabolismo aeróbico y anaeróbico (con ejercicios continuos o con intervalos) están basados principalmente en períodos de al menos 6 semanas (Costill y col. 1979; Jacobs y col. 1987). Los pocos programas de duración más breve están basados generalmente en entrenamiento continuo de resistencia donde se inducen cambios hemodinámicos y metabólicos, pero no mejoran el rendimiento, el consumo máximo de oxígeno (VO_2) y no producen grandes cambios enzimáticos (Green y col. 1992; Cadefau y col. 1994; Phillips y col. 1996; Shoemaker y col. 1996).

Frecuentemente, los atletas requieren de un programa de entrenamiento especial que les permita obtener una buena forma física en el período de tiempo más breve posible, particularmente después de períodos de inactividad debida a lesiones, enfermedades o problemas personales. En estos casos, el cicloergómetro presenta ventajas frente a otros tipos de entrenamiento: bajo coste y tamaño del equipamiento requerido, gran número de músculos involucrados, fácil manejo de cargas, práctica "indoor" y compatibilidad con algunas lesiones de miembro superior.

En nuestros voluntarios se aplicó un programa de entrenamiento que se caracterizaba por altas cargas musculares y entrenamiento diario durante 14 días con el objetivo de producir las mayores respuestas en un corto intervalo de tiempo.

El objetivo del presente estudio fue describir los cambios bioquímicos y fisiológicos producidos en el metabolismo aeróbico y anaeróbico por medio de un nuevo programa de entrenamiento con altas cargas musculares, repetidas diariamente durante 14 días.

METODOS

Voluntarios

Cinco voluntarios sanos (hombres) aceptaron formar parte de este estudio. Su edad media (SD), peso y masa corporal eran: 20,8 (2,9) años, 171 (5) cm y 68,1 (4,2) kg, respectivamente. Todos eran activos, pero nadie participaba de otros programas de entrenamiento. Durante el período de estudio, todos los voluntarios pararon sus actividades físicas normales (recreacionales) y sólo se ejercitaron durante las sesiones de entrenamiento como parte del experimento. Anteriormente al experimento, los voluntarios se sometieron a un chequeo para asegurar su buen estado físico.

El experimento se llevó a cabo de acuerdo con el código de ética de la World Medical Association (Declaration of Helsinki), y se obtuvo la aprobación del Comité Ético del Hospital Clínic i Provincial de Barcelona. Todos los voluntarios fueron informados antes del inicio sobre el propósito del estudio y los posibles riesgos del protocolo de experimentación, dando su consentimiento de participación por escrito.

Protocolo de entrenamiento

Antes de iniciar el estudio se llevó a cabo un proceso de familiarización con el equipo y los procedimientos. El programa estaba constituido por 14 sesiones consecutivas de entrenamiento, por lo que los voluntarios entrenaron todos los días durante 2 semanas (fig. 1). Las sesiones, sin calentamiento previo, consistieron en series de 15-s en cicloergómetro con 45-s de descanso, y series de esfuerzo máximo de 30-s en cicloergómetro con 12-min de descanso. El número de repeticiones fue aumentando a lo largo de las sesiones. Las primeras tres sesiones estuvieron formadas por dos series de 15-s, y dos series de 30-s. En las sesiones siguientes, los números de series de 15-s y 30-s fueron aumentados en uno cada dos sesiones de entrenamiento. Las últimas tres sesiones consistieron en siete series de 15-s y siete series de 30-s.

La tensión en el cicloergómetro era de 0,075 kg por kg de masa corporal, y permaneció constante durante todo el estudio. Se registró tanto la frecuencia máxima de pedaleo como la mínima al concluir la serie.

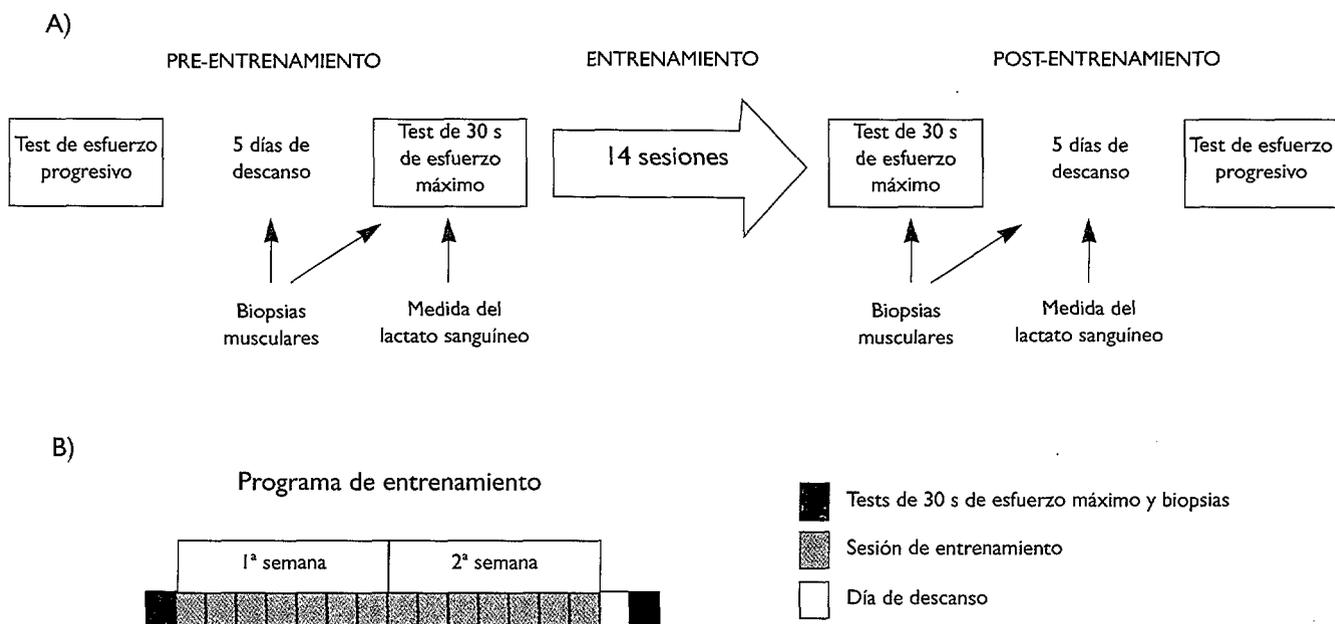
Los voluntarios fueron motivados y animados verbalmente durante el entrenamiento y se insistió en que debían pedalear con el máximo esfuerzo en cada sesión.

Tests de rendimiento

Los voluntarios realizaron tests de valoración del rendimiento antes y después del entrenamiento: de esfuerzo máxi-

Figura 1

A) Diseño del programa de entrenamiento ilustrando la distribución del entrenamiento, la recogida de muestras de biopsias y los días de descanso. B) Representación esquemática del estudio.



mo de 30-s y de esfuerzo progresivo (1 y 5 días antes y después del entrenamiento, respectivamente, Figura 1).

Los tests de esfuerzo máximo (Test de Wingate de 30-s) fueron realizados contra una tensión constante de $0,075 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \text{ masa corporal})^{-1}$. Para la realización del test se utilizó un cicloergómetro de fricción (Monark modelo 814E, Valberg) conectado a un ordenador para registrar las velocidades de pedaleo, que fueron monitorizadas cada 0,5 s. Dos parámetros fueron determinados: la potencia máxima, que corresponde al momento de mayor velocidad durante el test, y la potencia media que se refiere al promedio del trabajo realizado durante el test.

El test de esfuerzo progresivo empezó con un calentamiento de 25 W. La intensidad fue entonces aumentada cada minuto en 25 W hasta el agotamiento, momento en el cual los voluntarios son incapaces de mantener la frecuencia de pedaleo impuesta de 60 rpm. Fueron monitorizados los parámetros ventilatorios y registro electrocardiológico. Los latidos del corazón fueron monitorizados ($\text{latidos} \cdot \text{min}^{-1}$) usándose un aparato precordial CM-5.

Los tests se llevaron a cabo en condiciones controladas de temperatura y humedad (temperatura: $22\text{-}24^\circ\text{C}$ y humedad relativa: 55-65 %). A los voluntarios, se les pidió que descansasen las 24 h anteriores a cada test y comiesen frugalmente sin alcohol o estimulantes al menos 3 horas antes de

los tests, que es un procedimiento común en valoraciones físicas (Wasserman, 1987).

Parámetros ventilatorios y lactato sanguíneo

Para obtener los parámetros ventilatorios durante ambos tests, los participantes respiraron a través de una mascarilla (Rudolph 2700), y los intercambios gaseosos fueron analizados por un sistema de circuito abierto (Oxycon 4). El sistema fue calibrado antes de cada test en relación al volumen y flujo por medio de una jeringa (Hans Rudolph) y con gases obtenidos de un tanque de mezclas de oxígeno y dióxido de carbono de composición conocida. Los siguientes parámetros fueron registrados: ventilación pulmonar ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ BTPS), VO_2 ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ STPD) y dióxido de carbono expirado ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ STPD). Los valores respiratorios fueron obtenidos cada 30s.

Para el análisis del lactato fueron usados tubos capilares conteniendo heparina, fluoruro sódico y nitrito sódico, en los que se depositaba las muestras sanguíneas obtenidas del lóbulo de la oreja inmediatamente antes y después de 3, 5, 7 y 10 min de los tests de esfuerzo máximo, antes y después del entrenamiento. La concentración de lactato ($\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$) de cada muestra fue determinada por método electroenzimático (Micro Stat PLM4, Analox Instruments). El reactivo empleado fue un estándar de solución de lactato (ref. GMRD 090/091/092, Analox Instruments).

Biopsias musculares

Para la extracción de las biopsias, los voluntarios se colocaron en una camilla de exploración mientras se efectuaban pequeñas incisiones en ambas piernas a través de la piel y la fascia. Se utilizó la técnica de biopsia de aguja en el que las muestras (30 – 50 mg) son extraídas utilizando anestesia local (mepivacaina 2%) en la región media del *quadriceps femoralis* (*vastus lateralis*), 15 cm por encima del borde superior de la rótula en la primera ocasión (antes del entrenamiento) y 5 cm más arriba en la segunda ocasión (después del entrenamiento).

La primera muestra muscular era extraída de la pierna izquierda (en reposo). Entonces los voluntarios realizaban el test de 30-s y la segunda biopsia (de la pierna derecha) era extraída inmediatamente (menos de 2s), mientras permanecían sentados en el cicloergómetro. El mismo protocolo fue realizado antes (pre-) y después (post-) del entrenamiento. Las muestras fueron inmediatamente congeladas en nitrógeno líquido y almacenadas a una temperatura de -80°C hasta que fueran liofilizadas y analizadas.

Análisis bioquímicos

A las muestras liofilizadas se les extrajo el tejido conectivo y la sangre libre que pudo haber permanecido en el proceso y posteriormente fueron pulverizadas. Una parte de cada muestra (4 – 6 mg) fue tratada con 0,5 M HClO₄, centrifugada a 15.000 g a 4°C durante 15 minutos, y el sobrenadante fue neutralizado con 2,1 M KHCO₃. El neutralizado fue utilizado para la determinación de fosfocreatina (PCr), piruvato y lactato. Todo los metabolitos fueron analizados enzimáticamente y por técnica fluorimétrica (Lowry y Passonneau 1972). La concentración de glucógeno fue valorada en el neutralizado y en el precipitado después de la hidrólisis ácida por el método descrito por Lowry y Passonneau (1972).

Para las actividades enzimáticas, una parte de las muestras de músculo (4 - 6 mg) fue homogeneizada en 30 volúmenes de 50 mM HCl - Tris (pH 7), 4 mM EDTA, 50 mM KF, y 30 mM mercaptoethanol a 4°C, usándose un potter especial (Teflon pellet pestle, Kontes). La preparación fue centrifugada a 15.000 g y 4°C durante 15 min. Las actividades enzimáticas fueron inmediatamente valoradas espectrofotométricamente en el sobrenadante: creatin-quinasa (CK), fosfofructoquinasa (PFK), y lactato deshidrogenasa (LDH) usándose los métodos descritos en Cadefau y col. (1990); citrato sintasa (CS) y 3-hidroxyacyl-CoA deshidrogenasa (HADH) lo fueron por los métodos descritos en Essen-Gustavsson y Henriksson (1984).

Los valores de pH fueron calculados con las concentraciones de lactato y piruvato usándose la ecuación de Sahlin (Sahlin 1978) para tejidos secos, cuando la concentración se expresa en mmol·kg⁻¹:

$$\text{pH} = 7,06 - 0,00413 \times ([\text{lactato}] + [\text{piruvato}])$$

donde [lactato] y [piruvato] son las concentraciones de lactato y piruvato respectivamente.

Estadística

Los datos están expresados como valor medio (SD). El significado estadístico de la diferencia entre dos valores medios fue valorado por el test no paramétrico de Wilcoxon para valores apareados. El nivel de significado estadístico fue aceptado como P<0,05.

RESULTADOS

Cambios en los metabolitos musculares provocados por un test de 30-s

A partir de las biopsias que se realizaron antes del inicio del entrenamiento, se pudieron valorar los cambios en el metabolismo muscular inducidos por un test de esfuerzo máximo de 30-s (Test de Wingate).

Las concentraciones de fosfocreatina y glucógeno disminuyeron significativamente. El aumento en la concentración de lactato fue mayor a 10 veces el valor basal y el aumento en la concentración de piruvato alcanzó un nivel de 5 veces el basal. Después del test, dado que piruvato y lactato aumentaron sus concentraciones, el pH del músculo descendió sensiblemente (Tabla 1).

Efecto del entrenamiento sobre los cambios en el metabolismo muscular provocados por un test de 30-s

El programa de entrenamiento provocó un aumento significativo en las concentraciones basales de fosfocreatina (31%, P<0,05) y glucógeno (32%, P<0,05). Después del test, las concentraciones de fosfocreatina y glucógeno cayeron igual que lo hicieron en el test realizado antes del entrenamiento. Por otro lado, aunque el aumento en la concentración de lactato después del test fue muy significativo (P<0,01), este fue significativamente menor que la acumulación de lactato en el test realizado antes del entrenamiento.

Sin embargo, el lactato sanguíneo generado después del test de esfuerzo máximo post-entrenamiento fue mayor en un 25% que el lactato sanguíneo producido después del test de esfuerzo máximo pre-entrenamiento. Las concentraciones de las muestras previas a la realización de los tests fueron de

Tabla I Concentraciones de los metabolitos musculares en las biopsias antes y después del test de 30-s antes (Pre-) y después (Post-) del entrenamiento.

	Pre-entrenamiento		Post-entrenamiento	
	0 s	30 s	0 s	30 s
Fosfocreatina	53,2 ±6,3	20,0 ±8,5**	69,8 ±2,0 ^a	29,6 ±8,8**
Glucógeno	251 ±19	178 ±26**	332 ±22 ^a	281 ±25** ^a
Piruvato	0,30 ±0,03	1,49 ±0,70**	0,58 ±0,16	1,29 ±0,33**
Lactato	8,7 ±0,8	103,5 ±15,2**	9,4 ±2,2	87,0 ±17,3** ^a
pH	7,02 ±0,02	6,63 ±0,04*	7,02 ±0,03	6,70 ±0,04*

Los valores están expresados como promedio ± D.S., en mmol·(kg tejido seco)⁻¹. (*,**) Indica diferencias significativas (P<0,05, P<0,01) entre los valores a 0 s y a 30 s en el mismo periodo de entrenamiento. (a) Indica diferencias significativas (P<0,05) entre valores correspondientes a periodos de entrenamiento distintos.

1,38 (0,26) mM en el pre-entrenamiento y 1,64 (0,22) mM en el post-entrenamiento. A los 3, 5, 7 y 10 minutos de recuperación, los valores fueron de 10,3 (1,6), 11,8 (1,4), 13,2 (1,2), 11,9 (0,8) mM en el pre-entrenamiento y 14,6 (1,2), 16,2 (1,1), 15,3 (1,2) mM en el post-entrenamiento (P<0,05 en todos los casos de recuperación), respectivamente.

Adaptaciones enzimáticas al entrenamiento

Varias actividades enzimáticas se vieron alteradas como respuesta al entrenamiento (Tabla 2). La actividad de la CK mostró un aumento significativo del 44%. La LDH aumentó un 45% y la PFK aumentó un 100%. Las actividades enzimáticas relacionadas con el metabolismo oxidativo también aumentaron significativamente después del entrenamiento: CS un 38% y HADH un 60%.

Evolución del rendimiento

El aumento en la fuerza (fuerza máxima y fuerza media) en el test de 30-s fue mínimo y no significativo (3% y 3%, respectivamente). Sin embargo, un aumento significativo en el índice de pedaleo fue observado durante el entrenamiento (Fig. 2), que desapareció cuando a los voluntarios se les pidió que aumentaran el número de repeticiones de ejercicios hasta siete (últimas tres sesiones). La última sesión de entrenamiento mostró un evidente declive en el rendimiento. En contraste, el rendimiento en los tests de esfuerzo progresivo aumentó después del entrenamiento y los voluntarios fueron capaces de aumentar el nivel de fuerza en un 10% y el VO₂ en un

Tabla II Actividades enzimáticas en las biopsias musculares antes (Pre-) y después (Post-) del entrenamiento.

	Pre-entrenamiento	Post-entrenamiento
CK	10847 ±1686	15608 ±1873*
PFK	75,3 ±6,6	155,5 ±12,4**
LDH	886 ±89	1283 ±124*
HADH	19,3 ±2,7	30,9 ±3,1*
CS	28,1 ±2,4	38,8 ±1,6*

Los valores están expresados como promedio ± D.S., en U·(g tejido seco)⁻¹. (*,**) Indica diferencias significativas (P<0,05, P<0,01) entre valores correspondientes a periodos de entrenamiento distintos. (U=μmol·min⁻¹).

Tabla III Parámetros funcionales en la prueba de máximo esfuerzo progresivo y el de 30-s, antes (Pre-) y después (Post-) del entrenamiento.

	Pre-entrenamiento	Post-entrenamiento
Test Progresivo		
VO ₂ máx. (ml·(min·kg) ⁻¹)	57,3 ±2,6	63,8 ±3,0*
FC (puls·min ⁻¹)	189 ±5	195 ±4
Potencia (W)	300 ±11	330 ±21*
U.A. (ml·(min·kg) ⁻¹)	32,7 ±1,8	33,2 ±1,7
Test de 30-s		
VO ₂ máx. (ml·(min·kg) ⁻¹)	28,3 ±4,3	36,2 ±2,1*
FC (puls·min ⁻¹)	150 ±4	153 ±7
Potencia máx (W)	723 ±33	744 ±29
Potencia media (W)	578 ±30	595 ±24

Los valores están expresados como promedio ± D.S.

U.A. = Umbral Anaeróbico

(*) Indica diferencias significativas (P<0,05) entre valores del mismo parámetro correspondientes a periodos de entrenamiento distintos.

11%, siendo ambos aumentos significativos (Tabla 3). Se debe recordar que el test de esfuerzo progresivo post-entrenamiento fue llevado a cabo 5 días después del test de 30-s.

DISCUSION

Cada programa de entrenamiento afecta al músculo de forma diferente dependiendo del volumen de las cargas, de los periodos de recuperación y de la intensidad de los ejer-

cicios (Dudley y col. 1982). Parece claro que el metabolismo aeróbico puede ser mejorado mediante series de ejercicios intensos o por ejercicio continuo (de resistencia), aunque la actividad muscular continuada suele no producir mejoras en el metabolismo anaeróbico (Hollosoy 1975), mientras que sí lo consiguen series de ejercicios intensos de corta duración (Linossier y col. 1993). En general, cortos períodos de cargas musculares de alta intensidad inducen una respuesta adaptativa en el metabolismo anaeróbico (Thorstensson y col. 1975; Costill y col. 1979). Por otro lado, largos períodos de esfuerzo no tienen efectos considerables sobre el metabolismo de la fosfocreatina (metabolismo anaeróbico aláctico), pero pueden inducir extensas respuestas en el metabolismo glucolítico (Sahlin 1978; Cadefau y col. 1990).

En este estudio, los cambios en el metabolismo aeróbico fueron similares a aquellos observados con otros protocolos de mayor duración (Simoneau y col. 1986). Esta mejora en las vías aeróbicas con ejercicios intermitentes probablemente viene inducida por el importante papel del metabolismo aeróbico como fuente de ATP en los descansos entre la repetición de series de ejercicios de esfuerzo máximo (Bogdanis y col. 1996; Trump y col. 1996). Los intervalos de descanso tienen un papel crucial, ya que es durante este tiempo cuando las reservas de glucógeno son repuestas y la acumulación de lactato es reducida (Fox y col. 1989) por medio de la fosforilación oxidativa (Sahlin y col. 1979; Gaesser y Brooks 1984).

En relación al metabolismo aláctico, se debe tener especial atención al tiempo requerido para la resíntesis de la fosfocreatina, que para tests de 30-s de esfuerzo máximo es de 12 minutos (Bogdanis y col. 1995). Este período de recuperación puede ser una de las claves para las adaptaciones musculares inducidas por un protocolo de entrenamiento de alta intensidad, y puede estar relacionado con el incremento en las concentraciones de fosfocreatina observado después del entrenamiento. Aumentos en las concentraciones de fosfocreatina como consecuencia de un entrenamiento ya fueron descritos en otros estudios (Eriksson y col. 1973; McDougall y col. 1977), sin embargo, no siempre han sido encontrados (Thorstensson y col. 1975; Nevill y col. 1989; Stathis y col. 1994).

Todas estas adaptaciones, junto con el aumento en VO_2 max, indican una considerable mejora en los metabolismos aeróbicos y anaeróbicos.

Especialmente interesantes fueron los resultados de los valores de lactato tanto sanguíneo como los valorados en las biopsias musculares. La reducción de la concentración de lactato intramuscular al finalizar el test de 30-s post-entrenamiento respecto al test pre-entrenamiento podría ser debido a varios factores: la activación de la glucólisis, un reflujo aumen-

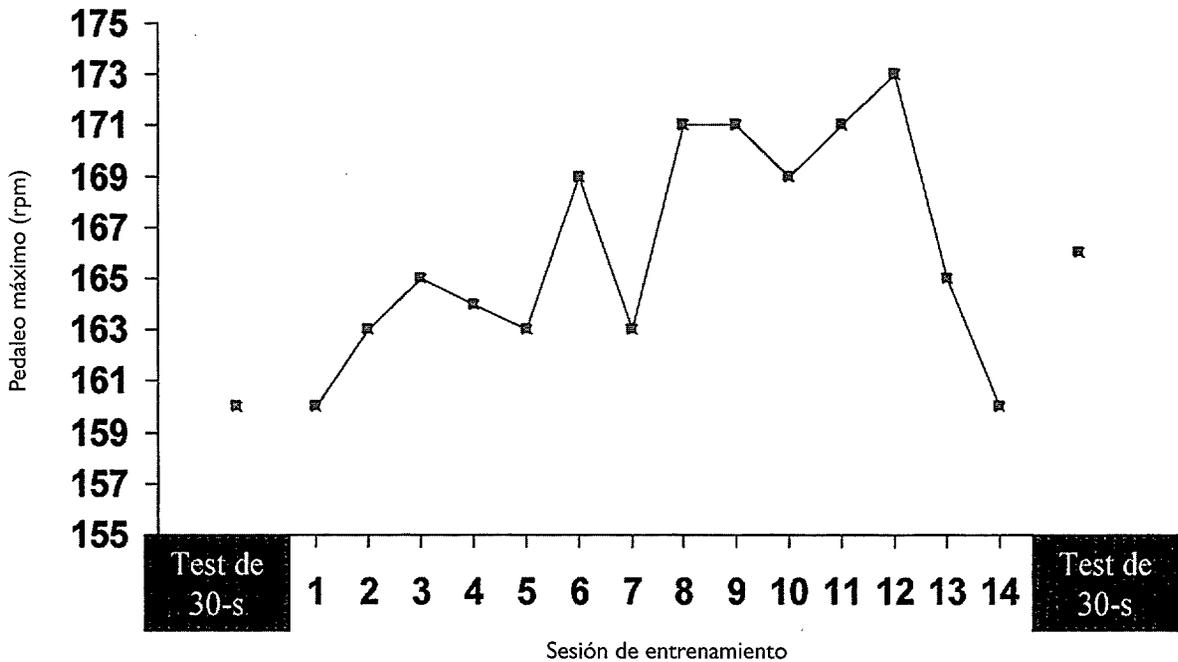
tado de lactato para la sangre (Fox y col. 1989), o a un aumento de la utilización en la fibra muscular. Se debe considerar también que el entrenamiento puede inducir a un aumento de la utilización del lactato como combustible metabólico para el sistema aeróbico. El uso de lactato como una fuente de energía muscular fue descrita como sensible a entrenamientos, y programas de resistencia cortos son capaces de aumentar el "clearance" de lactato (Phillips y col. 1995). Alteraciones inducidas por entrenamiento podrían haber provocado una disminución de la degradación de glucógeno y una reducción de la acumulación de lactato en el músculo durante el test de esfuerzo máximo post-entrenamiento. Esta reducción en la producción de energía por las vías anaeróbicas se debe relacionar a un aumento en la actividad de las vías oxidativas, que tienen un importante papel en este tipo de test (Granier y col. 1995).

En contraste con los valores musculares, se observó un aumento en la concentración de lactato sanguíneo durante el período de recuperación del test de 30-s post-entrenamiento. La cinética de eliminación del lactato a sangre por algún transportador de lactato no está completamente establecida. Sin embargo, este mecanismo puede verse afectado por el entrenamiento, en este caso permitiendo un aumento de lactato a sangre (Bonen y col. 1998). Wilson y col. (1998) describieron un nuevo transportador de monocarboxilato (MCT3), sugiriendo que podría ser el responsable del flujo de derivados glucolíticos del ácido láctico del músculo esquelético de contracción rápida. Nuestros resultados indican que el transporte de lactato de la célula muscular es independiente de la concentración muscular de lactato.

Aunque la mejora en el rendimiento de los tests de esfuerzo máximo fuera pequeña (realizados 1 día después del término del entrenamiento), se observó un significativo aumento en la frecuencia de pedaleo durante el entrenamiento (Fig. 2). La disminución en la frecuencia de pedaleo durante los últimos 2 días de entrenamiento, podría sugerir la aparición de síntomas de fatiga en los voluntarios. Adicionalmente, un elevado VO_2 max y una alta concentración de fosfocreatina y glucógeno muscular después del entrenamiento, y la baja concentración de lactato y acidosis durante el test de 30-s post-entrenamiento sugieren que el descenso en el rendimiento no tiene origen energético. Probablemente, podría ser atribuido a fatiga neuromuscular, ya que se ha demostrado que ésta se presenta después repeticiones de ejercicios de alta intensidad (con elevadas cargas), produciendo variaciones en la potencia de propagación (Strojnik y Komi 1998). Cuando esta fatiga desapareciese, el rendimiento del test de 30-s probablemente mejoraría debido a los parámetros bioquímicos favorables. El hecho de que el test de esfuerzo prop-

Figura II

Resultados del pedaleo máximo en las series de 30-s durante las sesiones de entrenamiento. Cada punto representa el promedio de los mejores resultados de cada voluntario.



gresivo (dónde se detectó una significativa mejora en el rendimiento) se realizara 5 días después del test de 30-s, debe ser considerado junto al gran número de estudios en los que se muestra una relación directa entre metabolismo aeróbico y anaeróbico y rendimiento (Roberts y col. 1982; Linossier y col. 1997; MacDougall y col. 1998).

Como conclusión, el presente estudio valida la eficacia de un nuevo programa de entrenamiento muy corto, diario y de alta intensidad (con un máximo de 5 min totales de ejercicios por día) que puede mejorar la actividad enzimática relacionada tanto con el metabolismo aeróbico como el anaeróbico en apenas 2 semanas. El protocolo de entrenamiento propuesto en este estudio aumenta significativamente las concentraciones de los componentes energéticos (fosfocrea-

tina y glucógeno) y la actividad enzimática de las vías aeróbicas (CS y HADH), anaeróbicas alácticas (CK) y anaeróbicas lácticas (PFK y LDH) en los músculos. Es por tanto un procedimiento muy corto y conveniente, y de particular interés cuando un aumento de las vías aeróbicas y anaeróbicas es requerido en un breve período de tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue realizado con el apoyo de la Direcció General de l'Esport (Generalitat de Catalunya 1993). CICYT SAF95-1045 y Ministerio de Sanidad (FISS 95/0994). Los autores agradecen especialmente a los voluntarios su participación en el estudio.

Bibliografía

Abernethy PJ, Thayer R, Taylor AW (1990) Acute and chronic responses of skeletal muscle to endurance and sprint exercise. *Sports Med* 10: 365-389
 Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HKA, Nevill AM (1995) Recovery of power output and muscle metabolites fo-

llowing 30 s of maximal sprint cycling in man. *J Physiol Lond* 482: 467-480

Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HKA (1996) Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *J Appl Physiol* 80: 876-884

- Bonen A, McCullagh KJ, Putman CT, Hultman E, Jones NL, Heigenhauser GJ (1998) Short-term training increases human muscle MCT1 and femoral venous lactate in relation to muscle lactate. *Am J Physiol* 274:E102-E107
- Cadefau J, Casademont J, Grau JM, Fernandez J, Balaguer A, Vermet M, Cusso R, Urbano-Marquez A (1990) Biochemical and histochemical adaptation to sprint training in young athletes. *Acta Physiol Scand* 140: 341-351
- Cadefau J, Green HJ, Cusso R, Ball-Burnett M, Jamieson G (1994) Coupling of muscle phosphorylation potential to glycolysis during work after short-term training. *J Appl Physiol* 76: 2586-2593
- Costill DL, Coyle EF, Fink WF, Lesmes GR, Witzmann FA (1979) Adaptations in skeletal muscle following strength training. *J Appl Physiol* 46: 96-99
- Dudley GA, Abraham WM, Terjung RL (1982) Influence of exercise intensity and duration on biochemical adaptations in skeletal muscle. *J Appl Physiol* 53: 844-850
- Eriksson BO, Gollnick PD, Saltin B (1973) Muscle metabolism and enzyme activities after training in boys 11-13 years old. *Acta Physiol Scand* 87:485-497
- Essen-Gustavsson B, Henriksson J (1984) Enzyme levels in pools of microdissected human fibres of identified type. *Acta Physiol Scand* 120: 505-515
- Gaesser GA, Brooks GA (1984) Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review. *Med Sci Sports Exerc* 16: 29-43
- Granier P, Mercier B, Mercier J, Anselme F, Prefaut C (1995) Aerobic and anaerobic contribution to Wingate test performance in sprint and middle-distance runners. *Eur J Appl Physiol* 70: 58-65
- Green HJ, Helyar R, Ball-Burnett M, Kowalchuk N, Symon S, Farrance B (1992) Metabolic adaptations to training precede changes in muscle mitochondrial capacity. *J Appl Physiol* 72: 484-491
- Henriksson J (1996) Muscle adaptation to endurance training: impact on fuel selection during exercise. In: *Biochemistry of Exercise*. Ed Maughan RJ and Shirreffs SM. Vol IX pp 329-338 Human Kinetic Publishers, Inc Champaign, IL
- Holloszy JO (1975) Adaptation of skeletal muscle to endurance exercise. *Med Sci Sports* 7: 155-164
- Jacobs I, Esbjornsson M, Sylven C, Holm I, Jansson E (1987) Sprint training effects on muscle myoglobin, enzymes, fiber types, and blood lactate. *Med Sci Sports Exerc* 19: 368-374
- Linossier MT, Denis C, Dormois D, Geyssant A, Lacour JR (1993) Ergometric and metabolic adaptation to 5-s sprint training programme. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 67: 408-414
- Lowry OH and JV Passonneau (1972) *A Flexible System of Enzymatic Analysis*. Academic Press, New York, USA.
- Nevill ME, Boobis LH, Brooks S, Williams C (1989) Effect of training on muscle metabolism during treadmill sprinting. *J Appl Physiol* 67: 2376-2382
- MacDougall JD, Ward GR, Sale DG, Sutton JR (1977) Biochemical adaptation of human skeletal muscle to heavy resistance training and immobilization. *J Appl Physiol: Respiratory, Environmental & Exercise Physiology*. 43:700-703
- MacDougall JD, Hicks AL, MacDonald JR, McKelvie RS, Green HJ, Smith KM (1998) Muscle performance and enzymatic adaptations to sprint interval training. *J Appl Physiol* 84: 2138-2142
- Phillips SM, Green HJ, Tarnopolsky MA, Grant SM (1995) Increased clearance of lactate after short-term training in men. *J Appl Physiol* 79: 1862-1869
- Phillips SM, Green HJ, Tarnopolsky MA, Heigenhauser GJ, Grant SM (1996) Progressive effect of endurance training on metabolic adaptations in working skeletal muscle. *Am J Physiol* 270: E265-E272
- Roberts AD, Billeter R, Howald H (1982) Anaerobic muscle enzyme changes after interval training. *Int J Sports Med* 3: 18-21
- Sahlin K (1978) Intracellular pH and energy metabolism in skeletal muscle of man. *Acta Physiol Scand (Suppl)* 455: 1-56
- Sahlin K, Harris RC, Hultman E (1979) Resynthesis of creatine phosphate in human muscle after exercise in relation to intramuscular pH and availability of oxygen. *Scand J Clin Lab Invest* 39: 551-558
- Shoemaker JK, Phillips SM, Green HJ, Hughson RL (1996) Faster femoral artery blood velocity kinetics at the onset of exercise following short-term training. *Cardiovasc-Res* 31: 278-286
- Simoneau JA, Lortie G, Boulay MR, Marcotte M, Thibault MC, Bouchard C (1986) Inheritance of human skeletal muscle and anaerobic capacity adaptation to high-intensity intermittent training. *Int J Sports Med* 7:167-171
- Stathis CG, Febbraio MA, Carey MF, Snow RJ (1994) Influence of sprint training on human skeletal muscle purine nucleotide metabolism. *J Appl Physiol* 76: 1802-1809
- Strojnik V, Komi PV (1998) Neuromuscular fatigue after maximal stretch-shortening cycle exercise. *J Appl Physiol* 84: 344-350
- Thorstensson A, Sjodin B, Karlsson J (1975) Enzyme activities and muscle strength after "sprint training" in man. *Acta Physiol Scand* 94: 313-318
- Trump ME, Heigenhauser GJF, Putman CT, Spriet LL (1996) Importance of muscle phosphocreatine during intermittent maximal cycling. *J Appl Physiol* 80: 1574-1580
- Wasserman K (1987) *Principles of exercise testing and interpretation*. Lea & Febiger, Philadelphia, USA.
- Wilson MC, Jackson VN, Heddle C, Price NT, Pilegaard H, Juel C, Bonen A, Montgomery I, Hutter OF, Halestrap AP (1998) Lactic acid efflux from white skeletal muscle is catalyzed by the monocarboxylate transporter isoform MCT3. *J Biol Chem* 273: 15920-15926