

Descripción de la adaptación metabólica y cardiorrespiratoria de triatletas de distancia olímpica durante los sectores de natación y ciclismo

GONZÁLEZ-HARO C^{1,2};
GONZÁLEZ-DE-SUSO JM^{1,3}; VALLE J¹;
DÍAZ-BEITIA G¹; PADULLÉS JM²;
DROBNIC F¹.

1. Departament de Fisiologia,
Centre d'Alt Rendiment (CAR)
de Sant Cugat del Vallés.

2. Institut Nacional d'Educació
Física de Catalunya
(INEFC – Barcelona, U.B.).

3. Departamento Físico-Médico
Real Sociedad de Fútbol (SAD).

CORRESPONDENCIA:

Teléfono de contacto: 670.351.657
e-mail: ardcarlos@hotmail.com

Este trabajo fue galardonado en el 2º Congreso de la Societat Catalana de Medicina de l'Esport (2002) para la mejor comunicación libre de la sesión de Fisiología del Deporte.

RESUMEN: Con el presente estudio se ha pretendido caracterizar la adaptación cardiorrespiratoria y metabólica de triatletas de buen nivel durante una simulación de los sectores de natación y ciclismo, y la primera transición, de un triatlón de distancia olímpica a ritmo de competición. Seis triatletas de categoría nacional e internacional se sometieron a un protocolo consistente en realizar 1500 m de natación seguidos de una transición y una hora en cicloergómetro a ritmo de competición, con lactatemia seriada, registro del intercambio de gases y de la frecuencia cardiaca. La velocidad media observada en el sector de natación fue de $1,29 \pm 0,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ correspondiente al $98 \pm 2\%$ de la velocidad aeróbica máxima (VAM). En el sector ciclista la potencia media desarrollada fue de $264 \pm 28 \text{ W}$, equivalente al $77 \pm 6\%$ de la potencia aeróbica máxima (PAM). La VAM correlacionó con el rendimiento en el sector de natación ($r = 0,944$; $p < 0,05$). A pesar de ingerir $1,08 \pm 0,44 \text{ l}$ de solución glucosada al 8%, se observó una reducción significativa del peso corporal ($2,8\%$; $p < 0,01$) y cambios en la potencia, velocidad y frecuencia de pedaleo, desarrolladas durante el sector ciclista, que aumentaron hacia el final del esfuerzo. No hubo diferencias en la concentración de lactato entre el final del sector de natación y el de la primera transición, ni para las diferentes variables cardiorrespiratorias y metabólicas (VO_2 , VE y $[\text{La}]$) registradas a lo largo de la prueba en cicloergómetro. A pesar de que el triatlón se entiende como un esfuerzo continuado, se debería considerar el rendimiento en cada sector por separado. En el presente estudio se observa que los sectores de natación y ciclismo se realizan a intensidades relativas diferentes. La disminución del peso corporal observada no altera la economía de pedaleo de triatletas de nivel nacional e internacional durante el sector ciclista, donde la intensidad del esfuerzo se ajusta a aquella situada en el umbral lactato individual. Sin embargo, cambios en la táctica competitiva y otros efectos, como la situación de rebufo en natación y ciclismo, podrían modificar las intensidades propias a cada sector observadas en este estudio. Queda por elucidar la repercusión del ritmo de competición observado sobre el rendimiento en la carrera a pie.

PALABRAS CLAVE: Triatlón de distancia olímpica, ritmo de competición, primera transición, economía de movimiento, metabolismo energético.

SUMMARY: The purpose of this study is typifying cardiorespiratory and metabolic adaptation capacity at race pace of high-level triathletes during simulations of Olympic distance triathlon swimming sector, cycling sector and first transition. Six national and international-level triathletes underwent a protocol consisting of a 1500 m swimming trial followed by a transition and one hour on ergocycle at race pace, with seriated determination of blood lactate concentration, gas exchange and cardio-frequency recording. The average speed remarked in the swimming sector was $1.29 \pm 0.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, matching $98 \pm 2\%$ of maximal aerobic speed (MAS). In the cycling sector, the average power was $264 \pm 28 \text{ W}$, matching $77 \pm 6\%$ of maximal aerobic power (MAP). MAS was correlated with performance in swimming sector ($r = 0.944$; $p < 0.05$). Despite ingesting $1.08 \pm 0.44 \text{ l}$ of a solution with 8% of glucose, a significant loss of body weight (2.8% ; $p < 0.01$) was remarked. Changes in pedaling power, speed and frequency, especially towards the end of the effort, were also remarked. Differences in lactate concentration and in cardiorespiratory or metabolic variables between the end of the swimming sector and the end of the first transition did not appear. Although triathlon is understood as a continuous effort, performance in each sector should be considered separately. This study remarks different relative intensities in cycling and swimming sectors. The remarked loss of body weight does not modify pedaling economy in national and international-level athletes during the cycling sector, where effort intensity adapts itself to the one found in individual lactate threshold. However, changes in competition tactics and other effects, such as drafting in swimming and cycling, could alter the intensities established in this study for each sector. We must still elucidate the effects of the remarked race pace on running performance.

KEY WORDS: Olympic distance triathlon, race pace, first transition, movement economy, energetic metabolism.

INTRODUCCION

El triatlón de distancia olímpica es una especialidad deportiva de reciente creación que debutó oficialmente en los JJOO de Sydney 2000. Este no se tiene que entender como la realización de tres actividades que se desarrollan de forma aislada sino como tres actividades enlazadas por medio de dos transiciones, constituyendo un esfuerzo continuo y de larga duración.

Varios estudios han puesto de manifiesto una disminución del rendimiento hacia el final de la prueba^(1,2,3) y otros trabajos han sugerido la existencia de una posible pérdida en la economía de movimiento a lo largo del triatlón de distancia olímpica⁽²⁾. Parece ser que se produce un efecto residual de los sectores de natación y de ciclismo sobre el de carrera a pie que, asociado al aumento de la temperatura central y a una pérdida en la homeostasis del balance hidroelectrolítico, incrementan la demanda energética^(2,4,5). Estas modificaciones fisiológicas se acentúan al inicio del sector de carrera a pie por los efectos específicos del sector ciclista. Concretamente, Hue y cols.⁽⁶⁾ observaron que el encadenamiento de un esfuerzo en cicloergómetro y de carrera a pie provoca un incremento significativo en la respuesta ventilatoria, así como de la capacidad de difusión pulmonar para el CO₂, desencadenando una fatiga de la musculatura respiratoria y/o un edema intersticial de pulmón. Hue y cols.⁽⁶⁾ también han observado, en la transición a la carrera a pie (T2), una serie de cambios en las variables metabólicas y cardiorrespiratorias, respecto a una prueba control, que generan un coste energético superior con una menor eficiencia ventilatoria. Esta disminución de la eficiencia ventilatoria puede ser debida a los cambios respiratorios registrados durante un ejercicio de resistencia de larga duración, particularmente con la hipoxia inducida por el ejercicio, tal y como sugieren Cailaud y cols.⁽⁶⁾. No obstante, todo ello podría estar relacionado con el nivel de rendimiento puesto que los mejores triatletas tienen un menor coste energético y mecánico en el sector de carrera a pie⁽⁷⁾. Estas alteraciones concurren con molestias musculares, muy probablemente relacionadas con la distinta frecuencia de movimiento observada en bicicleta (1,5-2 Hz) respecto a la carrera (1,0-1,5 Hz) y que la activación muscular, predominantemente concéntrica durante el pedaleo, pasa a ser excéntrica en la carrera⁽⁸⁾.

La mayor parte de estudios sobre el triatlón analizan la T2 y solo recientemente se han encontrado trabajos que, alejados de la realidad deportiva⁽⁸⁾, investiguen las repercusiones fisiológicas de la primera transición (T1) a pesar de su reconocida relevancia táctica^(1,3). El objetivo del presente estudio fue caracterizar, en un grupo de triatletas de nivel nacional e

internacional, la adaptación cardiorrespiratoria y metabólica durante una simulación de los sectores de natación y ciclismo, así como de la primera transición, de un triatlón de distancia olímpica a ritmo de competición.

MATERIAL Y METODOS

Sujetos

En el estudio, aprobado por el comité de ética del CAR de Sant Cugat, participaron 6 triatletas voluntarios. Los triatletas eran de nivel internacional (n = 4) y nacional (n = 2). Tenían una experiencia de entrenamiento y competitiva en distancia olímpica de 6,3 ± 3,8 años y una edad media de 25,3 ± 4,2 años. En el momento del estudio, las distancias semanales promedio de entrenamiento eran 23 km en natación, 250 km en bicicleta y 60 km en carrera a pie. Sus resultados en el último campeonato nacional del 2001 fueron de 1:57:24 h ± 0:01:54 h con una diferencia de rendimiento respecto al campeón nacional (5º en los JJOO de Sydney) de 7,5% ± 2,6%.

Determinación de la condición física

Todas las pruebas se realizaron en el Centro de Alto Rendimiento de Sant Cugat del Vallés (Barcelona).

Variables Cineantropométricas

El cálculo del porcentaje grasa y de la masa muscular se realizó conforme a la técnica de los cuatro compartimentos descrita por Drinkwater y Ross⁽⁹⁾. Las mediciones antropométricas se realizaron según la metodología de Ross y Marfell-Jones⁽¹⁰⁾, utilizando un compás de pliegues (John Bull, Inglaterra), una cinta antropométrica metálica flexible y no extensible, un antropómetro (Holtain LTD, Inglaterra) y un paquímetro (Holtain LTD, Inglaterra).

Determinación de la Velocidad Aeróbica Máxima (VAM) en natación

Se valoró la VAM en natación en una piscina cubierta de 25 m utilizando un protocolo modificado de Lavoie y Leone⁽¹¹⁾. Tras un calentamiento de 500 m, a un ritmo entre el 80% y el 90% de la VAM y una pausa pasiva de 5-10 min, se inicia, a 3,8 km·h⁻¹, una prueba continua escalonada con incrementos de velocidad de 0,1 km·h⁻¹ cada 2 min hasta el agotamiento. Un sistema acústico compuesto por dos altavoces conectados a un PC, donde se encontraba programado el test en una hoja de cálculo Excel.95, se utilizó para imponer la velocidad y guiar a los triatletas. El entrenador cami-

naba por el borde de la piscina, marcado cada 5 m, coincidiendo con las señales acústicas. Durante todo el test se registró la frecuencia cardíaca (XtrainerPlus®, Polar, Finlandia), la frecuencia de ciclo ($c \cdot \text{min}^{-1}$), los tiempos de paso cada 50 m, se calculó la longitud de ciclo en metros por ciclo ($m \cdot c^{-1}$) y la concentración de lactato sanguíneo a los 5 min de finalizar el esfuerzo, mediante un sistema amperométrico portátil (Lactate Pro®, Arkray, Japón)⁽¹²⁾ a partir de muestras sanguíneas de 5 μl obtenidas del lóbulo de la oreja.

Determinación de la Potencia Aeróbica Máxima (PAM) en cicloergómetro

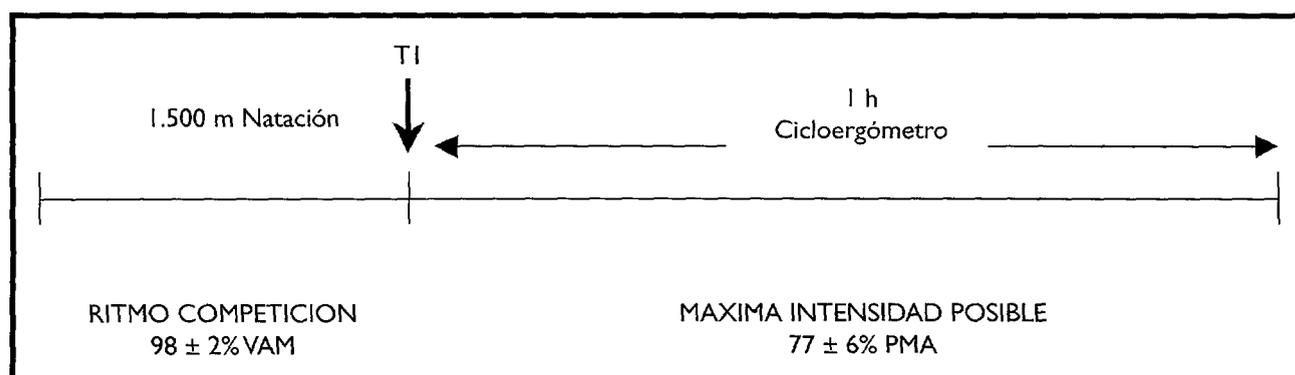
Se realizó sobre un cicloergómetro de freno electromagnético (Cardgirus®, España), mediante un protocolo modificado de Padilla y cols.⁽¹³⁾. Tras 10 min de calentamiento a 100 W, se realizaron escalones rectangulares de 4 min de duración, sin pausa entre ellos, con incrementos de 30 W hasta el agotamiento. La frecuencia ventilatoria (BF), el volumen corriente (VT), la fracción espirada de O_2 (FEO_2), la fracción espirada de CO_2 (FECO_2), la ventilación (V_E), el cociente respiratorio (RQ) y el consumo de oxígeno (VO_2) se midieron en tiempo real, durante todo el test, gracias a un sistema de intercambio de gases pulmonares Quark PFT® (Cosmed, Italia). Durante los últimos 15 s de cada escalón rectangular y a los 3 y 5 min de finalizar la prueba, se midió la lactatemia ([La]). La potencia aeróbica máxima se calculó como el valor promedio desarrollado en los últimos 4 minutos de esfuerzo. La determinación del consumo máximo de oxígeno ($\text{VO}_{2\text{máx}}$) se realizó como el valor promedio del último minuto de esfuerzo excepto cuando se identificó una meseta a pesar del incremento progresivo de la carga. El umbral ventilatorio se estableció mediante el método de la "V-Slope"⁽¹⁴⁾. La evolución de la concentración de lactato respec-

to a la potencia desarrollada se ajustó a una ecuación polinómica de segundo orden que permitió la determinación del umbral lactato individual (ULI) tal y como sugieren Roecker y cols.⁽¹⁵⁾.

Prueba experimental

El protocolo experimental consistió en nadar 1500 m en una piscina cubierta de 25 m, seguido de una rápida transición de 100 m corriendo, para acabar con un esfuerzo de 1h en el cicloergómetro de freno electromagnético (Cardgirus®, España). A los sujetos se les adiestró para desarrollar una intensidad igual a la de competición durante toda la simulación (Fig. 1). Todos los sujetos realizaron la prueba experimental entre 7 y 10 días tras la determinación de VAM y PAM. En el sector de natación se midió el tiempo parcial y la frecuencia de ciclo cada 50 m, así como la lactatemia nada más acabar el esfuerzo y tras la transición, esta vez ya con el sujeto sobre el cicloergómetro. Durante la simulación del sector ciclista se midió la potencia mecánica (W), la frecuencia de pedaleo (rpm) y la frecuencia cardíaca (FC). Además, se monitorizó el VO_2 , la V_E y la [La]. Las variables cardiorespiratorias se calcularon haciendo la media de los últimos 2 minutos a tiempo 10, 15, 30, 45 y 60 minutos de prueba; el lactato sanguíneo también se recogió al finalizar cada uno de esos intervalos de tiempo. Además, a lo largo del test en cicloergómetro, cada sujeto ingirió un promedio de 1080 ± 442 ml de agua azucarada al 8% (Just-aid2®, España), las condiciones ambientales durante la prueba fueron de $23,2 \pm 0,8$ °C de temperatura ambiente y de $48,5 \pm 9,4$ % de humedad relativa. Las variables respiratorias, la frecuencia cardíaca y la lactatemia se midieron con la metodología descrita anteriormente.

Fig. 1 Prueba experimental.



Análisis estadístico

Los resultados fueron expresados como media \pm DS. Las diferencias entre las variables cardiorrespiratorias, metabólicas y mecánicas se estudiaron mediante un ANOVA de medidas repetidas cuando había más de dos mediciones, o mediante una prueba T para muestras relacionadas cuando sólo fueron dos mediciones. El nivel de significación se estableció en $p < 0,05$ para todas las pruebas estadísticas realizadas. Como herramienta para el análisis estadístico de los datos se utilizó el paquete informático SPSS.10 y la hoja de cálculo Excel.00.

RESULTADOS

Los resultados de los parámetros de la condición física de los triatletas se pueden observar en las tablas 1-4.

Simulación de competición.

Esfuerzo en natación

La intensidad media del esfuerzo en el sector de natación, expresada como %VAM, fue del $98 \pm 2\%$, la frecuencia de ciclo de $37,2 \pm 3,2 \text{ c}\cdot\text{min}^{-1}$, la longitud de ciclo de $2,09 \pm 0,18 \text{ m}\cdot\text{c}^{-1}$ y la velocidad de nado (V_{media}) de $1,29 \pm 0,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Por otra parte se alcanzó una [La] al final de este sector de $6,8 \pm 2,1 \text{ mM}$, igual que la del final de la T1 ($6,6 \pm 1,8 \text{ mM}$) (Tabla 5). Una regresión lineal entre los valores de VAM y el rendimiento en este sector mostró una correlación significativa ($r = 0,944$; $p < 0,05$).

Tabla I Características morfológicas (media \pm DS).

Peso (kg)	69,9 \pm 4,6
Talla (cm)	175,2 \pm 4,5
Sumatorio 6 pliegues (mm)	38,9 \pm 5,7
Graso (%)	7,6 \pm 0,6
Muscular (%)	49,8 \pm 1,4

Pliegues: Tríceps, subescapular, abdominal, supraespal, muslo anterior y pierna medial.

Tabla II Resultados del test de VAM en natación (media \pm DS).

VAM ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1,33 \pm 0,08
FC ($\text{puls}\cdot\text{min}^{-1}$)	153 \pm 10
F_{Ciclo} ($\text{c}\cdot\text{min}^{-1}$)	35,9 \pm 6,2
L_{Ciclo} ($\text{m}\cdot\text{c}^{-1}$)	3,16 \pm 2,76
$[\text{La}]_{\text{máx}}$ (mM)	6,4 \pm 1,4

VAM: Velocidad aeróbica máxima; FC: Frecuencia cardíaca; FB: Frecuencia de brazada; LB: Longitud de brazada; $[\text{La}]_{\text{máx}}$: Lactatemia máxima.

Tabla III Resultados de la determinación de la PAM en cicloergómetro (media \pm DS).

$\text{VO}_{2\text{máx}}$	($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	64,7 \pm 5,7
	($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$)	4,6 \pm 0,3
PAM	(W)	345 \pm 14
	($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$)	4,9 \pm 0,3
$[\text{La}]_{\text{máx}}$	(mM)	8,8 \pm 1,5
$\text{FC}_{\text{máx}}$	($\text{puls}\cdot\text{min}^{-1}$)	176 \pm 14

$\text{VO}_{2\text{máx}}$: Consumo máximo de oxígeno; PAM: Potencia aeróbica máxima.

Tabla IV Resultados de la adaptación submáxima en cicloergómetro (media \pm DS).

	ULI	U2mM	U4mM	V-Slope
PAM (%)	76 \pm 4	74 \pm 4	83 \pm 5	81 \pm 4
Potencia (W)	273 \pm 38	266 \pm 39	298 \pm 40	290 \pm 27
FC ($\text{puls}\cdot\text{min}^{-1}$)	150 \pm 14	148 \pm 13	157 \pm 11	155 \pm 10
$[\text{La}]$ (mM)	2,4 \pm 0,1	2,0 \pm 0,0	4,0 \pm 0,0	3,3 \pm 1,1

PAM (%): Porcentaje de la potencia aeróbica máxima; ULI: Umbral lactato individual; U2mM: Umbral 2mM de lactato; U4mM: Umbral 4mM de lactato; V-Slope: Umbral ventilatorio.

Tabla V Resultados de la simulación de la prueba de 1500 m natación (media \pm DS).

	V ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	VAM (%)	F_{Ciclo} ($\text{c}\cdot\text{min}^{-1}$)	L_{Ciclo} ($\text{m}\cdot\text{c}^{-1}$)	$[\text{La}]_{\text{n}}$ (mM)	$[\text{La}]_{\text{t1}}$ (mM)
X	1,29	98	37,2	2,09	6,8	6,6
DS	0,07	2	3,2	0,18	2,1	1,8
RANGO	1,23-1,40	95-101	33,3-41,8	1,82-2,30	3,9-8,9	4,1-8,4

V: Velocidad; VAM: Velocidad aeróbica máxima; FB: Frecuencia de brazada; LB: Longitud de brazada; $[\text{La}]_{\text{n}}$: Lactatemia final sector natación; $[\text{La}]_{\text{t1}}$: Lactatemia al inicio sector ciclismo.

Simulación de competición. Esfuerzo en cicloergómetro

La potencia media desarrollada en este sector fue de 264 ± 28 W, equivalente al $77 \pm 6\%$ de la PAM. La frecuencia de pedaleo promedio fue de 99 ± 3 rpm y el ergómetro calculó una velocidad promedio de $38,0 \pm 1,6$ km·h⁻¹. Los valores medios de las variables fisiológicas registrados durante este sector fueron; 162 ± 13 puls·min⁻¹, 3788 ± 327 ml·min⁻¹ de VO₂ y $112,8 \pm 20,8$ l·min⁻¹ de V_E (todos los resultados en la tabla 6 y 7). La potencia desarrollada disminuye significativamente hasta el minuto 44 para aumentar hacia el final de la misma (Tabla 6). Con respecto a la frecuencia de pedaleo, se ha observado una disminución significativa desde el inicio

hasta el intervalo de los 27-28 min para volver a aumentar hasta el final de la prueba (Tabla 6). Por otro lado, no se han encontrado diferencias significativas en el VO₂ ni en la V_E, a pesar del incremento progresivo de ambos parámetros durante la prueba (Tabla 6). A pesar de tener un comportamiento similar al de la potencia desarrollada, no se encontraron diferencias significativas en la [La] entre el final del sector de natación, el final de la T1 y a lo largo del sector ciclista. Sin embargo, en este último sector, la cinética del lactato tiende a disminuir hasta el minuto 45 para aumentar al final del mismo (Tabla 7). Por último, se ha observado una pérdida de peso significativa de un 2,8% durante el protocolo experimental ($71,7 \pm 3,7$ kg vs. $69,7 \pm 3,4$ kg; $p < 0,001$).

Tabla VI Resultados de la prueba en cicloergómetro (media \pm DS)

	8-10 min	12-14 min	27-28 min	42-44 min	57-59 min	Promedio
Potencia (W)	265 \pm 37	261 \pm 32**	263 \pm 29**	262 \pm 30**	281 \pm 39**	264 \pm 28
VO₂ (ml·min⁻¹)	3683 \pm 240	3671 \pm 180	3841 \pm 354	3847 \pm 562	3994 \pm 422	3788 \pm 327
V_E (l·min⁻¹)	102,5 \pm 13,2	106,1 \pm 14,4	111,0 \pm 20,0	114,9 \pm 27,5	131,6 \pm 24,0	112,8 \pm 20,8
F_{pedaleo} (rpm)	100 \pm 4	99 \pm 3*	97 \pm 4*	98 \pm 4*	99 \pm 3*	99 \pm 3
FC (puls·min⁻¹)	161 \pm 14	161 \pm 14	163 \pm 13	164 \pm 13	167 \pm 13	162 \pm 13

$p < 0,05^*$; $p < 0,01^{**}$ (Diferencias respecto a 8-10 min).

VO₂: Consumo de oxígeno; V_E: Ventilación; FB: Frecuencia de brazada; FC: Frecuencia cardiaca.

Tabla VII Resultados de la prueba en cicloergómetro (media \pm DS).

	15 min	30 min	45 min	60 min	Basal
[La] (mM)	5,2 \pm 1,5	4,3 \pm 1,3	4,1 \pm 1,6	4,8 \pm 2,7	6,6 \pm 1,8

[La]: Lactatemia.

DISCUSION

Los resultados del presente estudio mostraron que el encadenamiento en triatlón de los sectores de natación y ciclismo, lejos de resultar un esfuerzo homogéneo de aproximadamente 80 minutos de duración, supone una intensidad de esfuerzo relativa propia a cada sector. El porcentaje de la potencia aeróbica máxima desarrollado en natación, así como la lactatemia al final del esfuerzo son muy superiores a los observados en el sector ciclista.

En este estudio, los sujetos realizaron el sector de natación a una velocidad de $1,29 \pm 0,07$ m·s⁻¹, mostrando una [La] de $6,8 \pm 1,8$ mM al final del mismo. Esta intensidad de esfuerzo implica un mayor rendimiento respecto a otros es-

tudios con triatletas donde se observaron velocidades de nado inferiores ($1,18$; $1,17$ y $1,16$ m·s⁻¹;^(8, 16, 17). Por otro lado, la frecuencia y la longitud de ciclo en el sector de natación fueron de $37,2 \pm 3,2$ c·min⁻¹ y $2,1 \pm 0,2$ m·c⁻¹, respectivamente. Estos últimos datos, por falta de referencias, no podemos compararlos con triatletas pero, comparados con nadadores de alto nivel, son sensiblemente inferiores a los hallados en tres finalistas de los 1500 m en las olimpiadas de Sydney 2000 ($41,8 \pm 3,3$ c·min⁻¹ y $2,4 \pm 0,2$ m·c⁻¹). Estas diferencias se deben, probablemente, a que los nadadores están mejor adaptados al medio acuático (mayor longitud y frecuencia de brazada)⁽¹⁸⁾. Además, para una misma potencia metabólica, los nadadores son capaces de aplicar una mayor potencia mecánica para desplazarse que los triatletas^(19, 20) por lo que

tienen una mayor eficiencia propulsiva que resulta determinante para el rendimiento en natación⁽²¹⁾. Esta desventaja, que obliga a un considerable gasto energético desde el inicio del triatlón, podría minimizarse en competición. Se ha observado que la utilización del procedimiento táctico de aprovechar el rebufo de otro triatleta (*drafting*) muestra mejoras en el rendimiento del 3,2% en una distancia de 400 m, con una reducción de la frecuencia de ciclo del 3,4% y un aumento de la longitud de ciclo del 6,2%^(22, 23). Otra estrategia táctica es la utilización del traje de neopreno que, para una velocidad de 1,25 m·seg⁻¹, reduce la resistencia del medio en un 16%^(24, 25).

Por otro lado, a pesar de trabajar con un reducido número de sujetos, se observó una correlación significativa entre la V_{media} del sector de natación y la prueba de VAM previa ($r = 0,944$; $p < 0,05$). Esto sugiere la utilización de la VAM como herramienta de trabajo para programar las intensidades de entrenamiento, tal y como han propuesto otros autores en atletas de resistencia de media y larga duración^(26, 15). Además, algunos autores han observado que la VAM tiene mucha más relación con el rendimiento en estas especialidades que con el $VO_{2\text{máx}}$ ^(27, 28). La explicación de esta relación se atribuye a que la VAM es una variable en la que interaccionan dos factores, la economía de movimiento y el $VO_{2\text{máx}}$. Ambos factores son determinantes para el rendimiento en actividades de media y larga duración⁽²⁹⁾. A la luz de estos datos, en nadadores y triatletas, la determinación de la VAM mediante una prueba continua, escalonada y máxima podría ser una herramienta de valoración funcional más adecuada que otras propuestas como la prueba de 400 m en estilo libre⁽³⁰⁾. Además, una prueba triangular ofrece mayor validez para la determinación del $VO_{2\text{máx}}$ que una prueba de 400 m⁽²⁶⁾. Con esta última, la correlación más elevada entre el rendimiento en 400 m y el $VO_{2\text{máx}}$ en nadadores de elite es de $r = 0,80$ ^(31, 32), mientras que hay autores que no han encontrado correlaciones significativas⁽³³⁾. No obstante, se necesitan futuros estudios para confirmar la relación entre la VAM en natación, el rendimiento competitivo y su aplicación al entrenamiento de triatletas y nadadores.

En la transición hacia el esfuerzo en cicloergómetro cabe destacar el hecho de que no existan diferencias significativas entre la lactatemia al acabar el esfuerzo en natación y la previa al esfuerzo ciclista. Esto puede ser debido a que la muestra de sangre se obtuvo nada más subirse el triatleta al cicloergómetro, sin dar tiempo a observar la lógica evolución que proporcionaría otros valores entre el 3^{er} y 5^o minuto⁽³⁴⁾. Otra explicación, aunque menos probable, sería que la T1 no provoca un incremento de la demanda de producción de ener-

gía respecto a la natación. Esto supone un hecho diferencial respecto a la T2, donde Hue y cols.⁽⁵⁾ han sugerido la intervención de la glucólisis anaeróbica en la producción de energía para satisfacer el incremento en la demanda energética tras acabar el esfuerzo ciclista y comenzar la carrera a pie, probablemente atribuido al cambio en el patrón motor del movimiento⁽⁵⁾.

Durante la simulación del sector ciclista, los triatletas del presente estudio, han desarrollado en promedio una potencia de pedaleo de 264 ± 28 W (77% de la PAM), un consumo de oxígeno de 3788 ± 327 ml·min⁻¹ (82,8% del $VO_{2\text{máx}}$), una frecuencia de pedaleo de 99 ± 3 rpm, una frecuencia cardíaca de 162 ± 13 puls·min⁻¹ (92% de la máxima FC), siendo la lactatemia al final del esfuerzo de $4,8 \pm 2,7$ mM. Estos valores son muy próximos a los encontrados en otro estudio, con manipulación de los tres sectores y una duración del sector ciclista de solo 30 minutos, donde los triatletas mostraron una FC media de 169 ± 11 puls·min⁻¹, una lactatemia de $8,4 \pm 0,5$ mM, una frecuencia de pedaleo de 99 ± 3 rpm y solicitaron el 85,6% del $VO_{2\text{máx}}$ ⁽¹⁶⁾. Delextrat y cols.⁽⁸⁾, en otro estudio donde los triatletas realizaron durante el sector ciclista un esfuerzo de 15 minutos de duración a la máxima intensidad posible, constataron una lactatemia de $7,7 \pm 2,9$ mM, una FC de 177 ± 13 puls·min⁻¹, una frecuencia de pedaleo de $91,1 \pm 7,7$ rpm y una potencia relativa del 75% de la PAM. Resulta sorprendente constatar que, comparados con estos estudios en los que se desarrollaron similares porcentajes de la PAM y de $VO_{2\text{máx}}$, los triatletas del estudio presentan una concentración de lactato sanguíneo muy inferior. Desconocemos el nivel de entrenamiento y la intensidad del umbral lactato de los triatletas participantes en el estudio de Hausswirth y cols.⁽¹⁶⁾. Por el contrario, Delextrat y cols.⁽⁸⁾ trabajaron con triatletas, de similar PAM y umbral anaeróbico, que entrenaban muy poco en bicicleta, solo 135 minutos de esfuerzo semanales para cubrir 59 km, por desarrollarse el estudio durante el invierno. Es muy probable que, si tenemos en cuenta los 250 km semanales de entrenamiento en bicicleta realizados por los triatletas del presente estudio, el menor acumulo de lactato sea producto de una mejor adaptación oxidativa para el ejercicio de larga duración.

El consumo máximo de oxígeno observado en la muestra de esta investigación es elevado, superior al de algunos estudios realizados con triatletas subelite ($61,25 \pm 3,21$ ml·kg⁻¹·min⁻¹)⁽³⁵⁾, similar al observado en recientes trabajos ($67,1 \pm 1,7$; $67,2 \pm 1,6$ ml·kg⁻¹·min⁻¹)^(17, 36), pero notablemente inferior al de triatletas de elite que participan habitualmente en pruebas de copa del mundo ($70,5 \pm 6,5$ ml·kg⁻¹·min⁻¹)⁽³⁷⁾.

Otros trabajos más antiguos^(38, 19), muestran un $VO_{2m\acute{a}x}$ de 63,7 – 69,9 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ en subelite, o próximo de 72,0 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$ en elite⁽³⁹⁾. Estos valores se alejan de los observados en ciclistas profesionales que muestran consumos máximos de oxígeno entre 70 y 80 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$, incluso superiores en los escaladores, hallándose el umbral lactato hacia el 90% $VO_{2m\acute{a}x}$ ⁽⁴⁰⁾. En triatletas, el umbral lactato parece situarse en porcentajes inferiores (72 - 88% $VO_{2m\acute{a}x}$)⁽⁴¹⁾. Esto último, sugiere que los ciclistas son más económicos que los triatletas tal y como ha sido constatado por Laursen y cols.⁽⁴²⁾ que, comparando ambos deportes, observaron el segundo umbral ventilatorio a una intensidad significativamente más elevada en los ciclistas. Además, si comparamos el rendimiento ciclista de los triatletas del presente estudio con el de ciclistas profesionales, se constata que los primeros en una contrarreloj individual del Tour de Francia del año 2002 obtuvieron un rendimiento de $50,0 \pm 0,1 km \cdot h^{-1}$, muy superior a los $38,0 \pm 1,6 km \cdot h^{-1}$ observados aquí. En este mismo sentido, comparando las variables metabólicas del presente estudio con el intento de record de la hora en ciclismo⁽⁴³⁾ se observa que los valores de frecuencia de pedaleo (101 rpm) y la lactatemia a los tres minutos de haber concluido la prueba (5,2 mM) fueron similares, aunque la intensidad de esfuerzo relativa fue muy superior durante la prueba del ciclista profesional (509,5 W).

Al acabar el sector de natación los triatletas presentaron una lactatemia elevada, muy superior a la observada al final del esfuerzo ciclista. Es probable que, durante el sector ciclista, los triatletas desarrollen una potencia que, aún siendo relativamente elevada, les permita eliminar el lactato acumulado durante el sector de natación. En este sentido, los triatletas desarrollaron la misma potencia que la correspondiente a su umbral lactato individual (77% de la PAM). El umbral lactato individual, relacionado con el máximo estado estable de lactato⁽⁴⁴⁾, es la intensidad de ejercicio donde se encuentra el mayor punto de equilibrio de la producción de lactato⁽⁴⁵⁾ que, en función de las exigencias de la especialidad deportiva, se encuentra entre el 60 y el 80% del $VO_{2m\acute{a}x}$ ⁽⁴⁶⁾. Este amplio abanico de intensidades puede verse favorecido por el criterio fisiológico utilizado al establecer la zona de transición porque, tal y como ocurre en el presente trabajo, se pueden observar diferencias cercanas al 10% de rendimiento. Por otro lado, durante un ejercicio en cicloergómetro, se ha observado que la intensidad de esfuerzo donde ocurre el mayor lavado de lactato es aquella cercana, y no superior, al umbral anaeróbico, alrededor del 65%-70% del $VO_{2m\acute{a}x}$ ⁽⁴⁷⁾. Estos datos justifican la cinética del lactato sanguíneo observada en este estudio, donde existe una conside-

table disminución a los 30 minutos del esfuerzo en cicloergómetro, 4,3 vs 6,8 mM, que no resulta significativa. La elección individual de esta intensidad de esfuerzo coincide con la observada por otros autores que sugieren la utilización predominante del metabolismo glucolítico⁽¹⁶⁾. En la presente experimentación, el cociente respiratorio ha proporcionado una contribución media del metabolismo lipolítico del $36,3 \pm 14,8\%$ y un $63,7 \pm 14,6\%$ de la glucólisis aeróbica, sin mostrar diferencias significativas a lo largo del sector ciclista. No obstante, y ahondando en las carencias energéticas de estos competidores frente a especialistas en las distintas disciplinas, no podemos olvidar que en situación real de competición los triatletas suelen ir a rueda de otros competidores llegando a reducir el coste energético entre un 21% y un 35%⁽⁴⁸⁾. Todo esto estaría de acuerdo con lo sugerido por Vercruyssen y cols.⁽⁴⁹⁾ y Hausswirth y cols.⁽¹⁶⁾ que reivindican la economía durante el sector ciclista para llegar en óptimas condiciones a la carrera a pie, dado que éste último resulta el sector determinante en el triatlón de distancia olímpica^(1,3).

Por otro lado, se ha sugerido que el patrón de movimiento está relacionado con el coste energético⁽⁵⁰⁾ y que uno de los principales factores determinantes del rendimiento es la capacidad para minimizar la cantidad de energía utilizada⁽⁵¹⁾. Por eso, durante la carrera a pie, los deportistas adoptan de forma natural frecuencias y amplitudes de zancada correspondientes al mínimo coste energético⁽⁵²⁾. Aunque parezca paradójico en ciclismo esto no es así. Desde inicios del siglo pasado se observó que la frecuencia de pedaleo óptima en ciclistas oscilaba sobre 1 Hz (60 rpm)⁽⁵³⁾, lo que se ha reproducido con posterioridad observando que la mejor eficiencia energética se corresponde con frecuencias de pedaleo entre 40 y 80 rpm⁽⁵⁰⁾. Los triatletas participantes en este estudio han adoptado, libremente, una frecuencia de pedaleo muy superior a la considerada como energéticamente óptima. Del mismo modo, los estudios de Hausswirth y cols.⁽¹⁶⁾ y Delextrat y cols.⁽⁶⁾ constatan frecuencias superiores a las 90 rpm y confirman lo observado por otros autores, en cadencias ligeramente inferiores⁽⁵⁴⁾, donde no se observan diferencias estadísticamente significativas, para ejercicios de larga duración, entre la adoptada libremente por los triatletas y la más energética. Otros trabajos, realizados con ciclistas, sugieren que la frecuencia de pedaleo podría adaptarse libremente respecto a un patrón de reclutamiento de unidades motoras correspondiente al que produce una mínima fatiga neuromuscular (90-100 rpm) y no con el energéticamente óptimo⁽⁵⁵⁾.

A lo largo del protocolo experimental los triatletas perdieron un 2,8% de su peso corporal. Diferentes autores han relacionado esta pérdida de peso con una relativa deshidrata-

ción que limitaría el rendimiento de los triatletas de nivel medio o principiantes^(2, 4). En el presente estudio no se han observado diferencias significativas en la evolución de las diferentes variables metabólicas ni respiratorias a pesar de que, durante el sector ciclista, existe una disminución de la potencia y de la frecuencia de pedaleo respecto a lo observado en los 10 primeros minutos y al final. La ingesta de una solución azucarada isotónica, la cantidad de entrenamiento realizada y el perfil fisiológico de los triatletas⁽⁷⁾ podrían explicar el mantenimiento del rendimiento. El hecho de que al final de la hora del esfuerzo ciclista aumente la demanda energética y la potencia desarrollada puede ser debido a que en esta simulación no se ha encadenado el trabajo de carrera a pie. Los triatletas, al conocer el inminente final de la prueba, realizaron ese esfuerzo suplementario durante los últimos minutos.

En conclusión, a pesar de que el triatlón se entiende como un esfuerzo continuado, es necesario considerar el rendimiento en cada sector por separado. En el presente estudio se observa que los sectores de natación y ciclismo se realizan a intensidades relativas diferentes. Las intensidades de competición en la simulación de los sectores de natación y de ciclismo del triatlón de distancia olímpica fueron del $98 \pm 2\%$ VAM y del $77 \pm 6\%$ PAM, respectivamente. La relación ob-

servada entre la prueba de VAM y el rendimiento en el sector natación sugiere, en triatletas de nivel nacional e internacional, la utilización de dicha prueba como herramienta para estructurar las intensidades de entrenamiento y predecir el rendimiento competitivo. La disminución de un 2,8% del peso corporal no altera la economía de pedaleo de triatletas de nivel nacional e internacional durante la realización del sector ciclista. En este sector, los triatletas ajustan la intensidad a aquella situada en el umbral lactato individual. Sin embargo, cambios en la táctica competitiva y otros efectos, como el drafting en natación y ciclismo, podrían modificar las intensidades relativas de esfuerzo observadas en este estudio. Queda por elucidar la repercusión del sector ciclista sobre el rendimiento en la carrera a pie.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio no se hubiese realizado sin la inestimable y desinteresada colaboración de J. M. Juárez, F. Juárez, D. Nielles, S. Huerta, M. Zamora y Carlos Gil (C. N. Reus Ploms, C.N. Barcelona y Excelent Center Club).

Agradecemos la colaboración prestada del Dr. D. Nicolás Terrados Cepeda (Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte de Toledo, UCLM).

Bibliografía

1. CHAVARREN J, DORADO C, LÓPEZ JA. Triatlón: Factores condicionantes del rendimiento y del entrenamiento. *RED* 1994;10:29-37
2. GUÉZENNEC CY, VALLIER JM, BIGARD AX, DUREY A. Increase in energy cost of running at the end of a triathlon. *Eur J Appl Physiol* 1996;73:440-445
3. GONZÁLEZ-HARO C, GONZÁLEZ-DE-SUSO JM. Gestión de la competición durante el triatlón de distancia olímpica. Análisis de los resultados de las temporadas 1998 – 1999 – 2000. *Apunts d'Educació Física* 2002;69:59-64
4. HUE O, GALLAIS DL, CHOLLET D. The influence of prior cycling on biomechanical and cardiorespiratory response profiles during running in triathlon. *Eur J Appl Physiol* 1998; 77:98-105
5. HUE O, GALLAIS D, BOUSSANA A, CHOLLET D, PREFAUT C. Ventilatory responses during experimental cycle-run transition in triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:1422-1428
6. CAILLAUD C, SERRE-COUSINÉ O, ANSELME F, CAPDEVILLA X, PRÉFAUT C. Computerized tomography and pulmonary diffusing capacity in highly trained athletes after performing a triathlon. *J Appl Physiol* 1995;79:1226-1232
7. MILLET GP, MILLET GY, HOFMANN MD, CANDAU RB. Alterations in running economy and mechanics after maximal cycling in Triathletes: Influence of performance level. *Int J Sports Med* 2000;21:127-132
8. DELEXTRAT A, TRICOT V, BERNARD T, VERCRUYSEN F, HAUSSWIRTH C, BRISSWALTER J. Drafting during Swimming improves efficiency during subsequent cycling. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35:1612-1619
9. DRINKWATER DT, ROSS. Anthropometric fractionation of body mass. En: Ostin M, Beunen G, Simon S, editores. *Kinanthropometry II*. Baltimore: University Park Press, 1980; 179-189
10. ROSS WD, MARFELL-JONES MJ. Kinanthropometry. En: McDougall JD, Wenger HA, Green HJ, editors. *Physiological testing of high-performance athletes*. Champaign III: Human Kinetics, 1991: 223-308
11. LAVOIE JM, LEONE M. La puissance maximale fonctionnelle (PAMF) et l'indice de mouvements de bras (IMB) en nata-

- tion: Normes et prediction de la performance au crawl. Montréal, Département d'éducation physique, Université de Montréal, 1987.
12. PYNE DB, BOSTON T, MARTIN DT, LOGAN A. Evaluation of the Lactate Pro blood lactate analyser. *Eur J Appl Physiol* 2000;82:112-116
 13. PADILLA S, MUJICA I, ORBAÑOS J, SANTISTEBAN J, ANGULO F, GOIRIENA JJ. Exercise intensity and load during mass-start stage in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33:796-802
 14. BEAVER WL, WASSERMAN K, WHIPP BJ. A new method for detecting the anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* 1986;60:2020-2027
 15. ROECKER K, SCHOTTE O, NIESS AM, HORSTMANN T, DICKHUTH H-H. Predicting competition performance in long-distance running by means of a treadmill test. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:1552-1557
 16. HAUSSWIRTH C, LEHÉNAFF D, DRÉANO P, SAVONEN K. Effects of cycling alone or in a sheltered position on subsequent running performance during a triathlon. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:599-604
 17. SCHABORT EJ, KILLIAN SC, ST CLAIR GIBSON A, HAWLEY JA, NOAKES TD. Prediction of triathlon race time from laboratory testing in national triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32:844-849
 18. CRAIG AB, SKEHAN PL, PAWELCZYK JA, BOOMER WL. Velocity, stroke rate, and distance per stroke during elite swimming competition. *Med Sci Sports Exerc* 1985;17:625-634
 19. KOHRT WM, MORGAN DW, BATES B, SKINNER JS. Physiological responses of triathletes to maximal swimming, cycling and running. *Med Sci Sports Exerc* 1987;19:51-55
 20. TOUSSAINT HM. Differences in propelling efficiency between competitive and triathlon swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 1990;22:409-415
 21. TOUSSAINT HM, BEELEN A, RODENBURG A, SARGEANT AJ, GROOT G, HOLLANDER AP, VAN INGEN SCHENAU GJ. Propelling efficiency of front-crawl swimming. *J Appl Physiol* 1998;65:2506-2512
 22. CHATARD JC, CHOLLET D, MILLET G. Performance and drag during drafting swimming in highly trained triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:1276-1280
 23. CHOLLET D, HUE O, AUCLAIR F, MILLET G, CHATARD JC. The effect of drafting on stroking variations during swimming in elite male triathletes. *Eur J Appl Physiol* 2000;82:413-417
 24. CHATARD JC, SENEGAS X, SELLES M, DREANOT P, GEYSSANT A. Wet suit effect: a comparison between comparative swimmers and triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 1995;27:580-586
 25. TOUSSAINT HM, BRUININK L, COSTER R, LOOZE MD, VAN ROSSEM B, VAN VEENEN R, GROOT GD. Effect of a triathlon wet suit on drag during swimming. *Med Sci Sports Exerc* 1989;21:325-328
 26. LÉGER LA, BOUCHER R. An indirect continuous running multistage field test: The université de Montreal track test. *Can J Appl Sports Sci* 1980;5:77-84
 27. NOAKES TD. Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a contemporary perspective. *Med Sci Sports Exerc* 1988;20:319-330
 28. MORGAN DW, BALDINI FD, MARTIN PE, KOHRT WM. Ten kilometer performance and predicted velocity at VO_{2max} among well-trained male runners. *Med Sci Sports Exerc* 1989;21: 78-83
 29. BILLAT LV, KORALSZTEIN P. Significance of the velocity at VO_{2max} and time to exhaustion at this velocity. *Sports Med* 1996; 22:90-108
 30. RODRÍGUEZ FA. Maximal oxygen uptake and cardiorespiratory response to maximal 400-m free swimming, running and cycling tests in competitive swimmers. *J Sports Med Phys Fit* 2000; 40:87-95
 31. RIBEIRO JP, CADAVID E, BAENA J, MONSALVETE E, BARNA A, DE ROSE EH. Metabolic predictors of middle-distance swimming performance. *Br J Sports Med* 1990; 24:196-200
 32. COSTILL DL, MAGLISHO EW, RICHARDSON AB. Swimming. London: Blackwell Scientific Publications, 1992
 33. WAKAYOSHI K, YOSHIDA T, UDO M, KASAI T, MORITANI T, MUTOH Y, MIYASHITA M. A simple method for determining critical speed as swimming fatigue threshold in competitive swimming. *Int J Sports Med* 1992;13:367-371
 34. FREUND H, OYONO-ENGUELLE S, HEITZ A, OTT C, MARBACH J, GARTNER M, PAPE A. Comparative lactate kinetics after short and prolonged submaximal exercise. *Int J Sports Med* 1990;11:284-288
 35. ZHOU S, ROBSON SJ, KING MJ, DAVIE AJ. Correlations between short-course triathlon performance and physiological variables determined in laboratory cycle and treadmill tests. *J Sports Med Phys Fit* 1997;37:122-130
 36. HUE O, GALY O, LE GALLAIS D, PRÉFAUT C. Pulmonary responses during the cycle-run succession in elite and competitive triathletes. *Can J Appl Physiol* 2001;26:559-573
 37. HUE O. Prediction of rafted-triathlon race time from submaximal laboratory testing in elite triathletes. *Can J Appl Physiol* 2003;28:547560
 38. KREIDER RB, CUNDIFF DE, HAMMETT JB. Effects of cycling on running performance in triathletes. *Ann Sports Med* 1988;3:220-225
 39. HOLLY RG, BARNARD RJ, ROSENTHAL M, APPELGATE E, PRITIKIN N. Triathlete characterisation and response to prolonged strenuous competition. *Med Sci Sports Exerc* 1986;18:123-127
 40. LUCÍA A, HOYOS J, CHICHARRO JL. Physiological response to professional road cycling: climbers vs. time trialists. *Int J Sports Med* 2000;21:505-512

41. O'TOOLE M, DOUGLAS PS. Applied physiology of triathlon. *Sports Med* 1995;19:251-267
42. LAURSEN PB, SHING CM, TENNANT SC, PRENTICE CM, JENKINS DG. A comparison of the cycling performance of cyclists and triathletes. *J Sports Sci* 2003;21:411-418
43. PADILLA S, MUJICA I, ANGULO F, GOIRIENA JJ. Scientific approach to the 1-h cycling world record: a case study. *J Appl Physiol* 2000;89:1522-1527
44. SVEDAHL K, MACINTOSH BR. Anaerobic threshold: The concept and methods of measurement. *Can J Appl Physiol* 2003;28:299-323
45. BILLAT VL, SIRVENT P, KORALSZTEIN G, MERCIER J. The concept of maximal lactate steady state: a bridge between biochemistry, physiology and sport science. *Sports Med* 2003;33:407-426
46. LAJOIE C, LAURENCELLE L, TRUDEAU F. Physiological responses to cycling for 60 minutes at maximal lactate steady state. *Can J Appl Physiol* 2000;25:250-261
47. STAMFORD BA, WELTMAN A, MOFFATT R, SADY S. Exercise recovery above and below anaerobic threshold following maximal work. *J Appl Physiol* 1981;51:840-844
48. NEUMANN G. Cycling, En: Shephard RJ, Astrand PO, editors. *Endurance in sport*. Oxford: Blackwell, 1992; 582-596
49. VERCRUYSSSEN F, BRISSWALTER J, HAUSSWIRTH C, BERNARD T, BERNARD O, VALLIER J-M. Influence of cycling cadence on subsequent running performance in triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:530-536
50. GREGOR RJ, BROKER JP, RYAN MM. The biomechanics of cycling. *Exerc Sci Rev* 1991;9:127-168
51. DI PRAMPERO PE. The energy cost of human locomotion on land and in winter. *Int J Sports Med* 1986;7:55-72
52. HOLT KG, JENG SF, RATCLIFFE R, HAMILL. Energetic cost and stability during human walking at the preferred stride frequency. *J Mot Behav* 1995;27:164-178
53. BENEDICT FG, CATHCART EP. Publication N° 187. Washington D. C., Carnegie Institution, 1913.
54. BRISSWALTER J, HAUSSWIRTH C, SMITH D, VERCRUYSSSEN F, VALLIER JM. Energetically optimal cadence vs. freely-chosen cadence during: effect of exercise duration. *Int J Appl Physiol* 1999;20:60-64
55. NEPTUNE RR, HULL ML. A theoretical analysis of preferred pedalling rate selection in endurance cycling. *J Biomech* 1999;32:409-415