PubliCE, (PubliCE) 1997

Monograph

Contribución Anaeróbica al Tiempo Hasta el Agotamiento a la Minima Intensidad de Ejercicio en la Cual se Produce el Consumo Máximo de Oxígeno en Ciclistas, Kayakistas y Nadadores de Elite

M Faina[1], V Billat[2], R Squadrone[1], M De Angelis[1], J P Koralsztein[3] y A Dal Monte[1]

[1]*Institute of Sport Science, Italian National Olympic Committee, Rome, Italia.*
[2]*Laboratoire S.T.A.P.S., University París XII, 61 av. General de Gaulle, F-94010 Créteil, Francia.*
[3]*Centre de Medecine du Sport, C.C.A.S., 2 av. Richerand, F-75010 París, Francia.*

RESUMEN

En 23 atletas masculinos de élite (8 ciclistas, 7 kayakistas, y 8 nadadores), realizamos la evaluación de la contribución del sistema de energía anaeróbico con el tiempo hasta el agotamiento (t_{LIM}) a la intensidad mínima de ejercicio (velocidad o potencia) (I_{VO2max}) en la cual se alcanza el máximo consumo de oxígeno (VO_{2max}), a través del análisis de la relación entre el t_{LIM} y el déficit del oxígeno acumulado (AOD). Después de una entrada en calor de 10 min a 60% de VO_{2max}, la intensidad del ejercicio se incrementó para que cada sujeto alcanzara su I_{VO2max} en 30 seg y luego continuó en ese nivel hasta que el sujeto estuviera exhausto. Las evaluaciones Pre- test incluyeron un test incremental continuo con etapas de 2 min para determinar la I_{VO2max} y una serie de 5 min a intensidades submáximas para recolectar datos que permitan la estimación del gasto de energía en I_{VO2max}. El AOD para el ejercicio del t_{LIM} se calculó como la diferencia entre la estimación anterior y el consumo de oxígeno acumulado. El valor del porcentaje medio de gasto de energía cubierto por el metabolismo anaeróbico fue 15,2 [(SD 6) %, intervalo 8,9-24,1] y se observaron diferencias significativas entre nadadores y kayakistas (16,8% contra 11,5%, $p<0,05$) y entre ciclistas y kayakistas (16,4% contra 11,5%, $p<0,05$). Los valores absolutos de AOD variaron de 26,4 $mL \cdot kg^{-1}$ a 83,6 $mL \cdot kg^{-1}$ con un valor medio de 45,9 (SD 18) $mL \cdot kg^{-1}$. Considerando todos los sujetos como un conjunto, se observó que el t_{LIM} presentó una correlación positiva y significativa con AOD ($r = 0,62$, $p<0,05$), y una correlación negativa y significativa con el VO_{2max} ($r=-0,46$, $p<0,05$). Los datos sugieren que la contribución de los procesos anaeróbicos durante el ejercicio realizado a I_{VO2max} no debe ser ignorada cuando el t_{LIM} se utiliza como un parámetro suplementario para evaluar la adaptación específica de los atletas.

Palabras Clave: tiempo hasta el agotamiento en el ejercicio, consumo de oxígeno máximo, éficit de oxígeno acumulado, metabolismo anaeróbico porcentual, demanda de energía

INTRODUCCION

Durante cierto tiempo se ha reconocido que la intensidad del ejercicio asociada con el consumo de oxígeno máximo ($I_{VO_{2max}}$), sin tener en cuenta su definición real y el protocolo utilizado para determinarla, contiene potencialmente información valiosa cuando se analizan los rendimientos de atletas de fondo y medio fondo (Lacour et al. 1991; Billat et al. 1994 b, c,; Hill y Rowell 1996). Análogamente, la determinaron del tiempo de ejercicio hasta el agotamiento en $I_{VO_{2max}}$, (nosotros emplearemos la abreviatura t_{LIM} para referirnos al mismo) se ha vuelto muy atractivo para evaluar varios aspectos del rendimiento y entrenamiento de atletas de resistencia (Billat et al. 1994 a, b, c).

En el laboratorio, la intensidad del ejercicio asociada con el consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}) normalmente se evalúa a través de dos procedimientos cuyos resultados son altamente dependientes de las condiciones experimentales. La $I_{VO_{2max}}$ ha sido determinada ya sea, a partir del costo de oxígeno del ejercicio en una intensidad submaxima (máxima intensidad de ejercicio que puede ser mantenida exclusivamente por el metabolismo aeróbico; di Prampero 1986; Lacour et al. 1991), o por la menor intensidad del ejercicio en la cual se alcanza el VO_{2max} durante un test incremental continuo (Billat et al. 1994 a, b, c). En el último caso, debido a la contribución anaeróbica con este test cuando se alcanza el VO_{2max},, se supone que $I_{VO_{2max}}$ sería más alta que la calculada en el procedimiento anterior. En un estudio con 22 corredoras, Hill y Rowell (1996) encontraron que los valores de $I_{VO_{2max}}$ obtenidos por el método de di Prampero eran 4% más bajos que los obtenidos con el método de Billat y concluyeron que los valores anteriores son específicos del método y no deben ser utilizados de modo intercambiable.

Recientemente, evaluando un grupo homogéneo de corredores de fondo de sub-élite, Billat et al. (1994 c) observaron que tanto $I_{VO_{2max}}$ como el t_{LIM}, estaban poco relacionados con la velocidad de carrera, mantenida en carreras de 3000 m y de medio-maratón. Además, los autores observaron que el t_{LIM} era muy variable entre los sujetos (valores comprendidos entre 262 s y 598 s.), y se relacionaba de manera positiva con el umbral del lactato (r = 0,58), pero no presentaba relación con VO_{2max}. Estos resultados, así como los datos de trabajos anteriores que se han centrado en la importancia relativa de la liberación de energía aeróbica y anaeróbica durante el ejercicio agotador de duración intermedia (Medbø y Tabata 1989; Houmard et al. 1991; Craig et al. 1993), sugieren la hipótesis que aunque el tiempo hasta el agotamiento en $I_{VO_{2max}}$ tiene un gran componente aeróbico, en los corredores también refleja la capacidad de realizar ejercicios anaeróbicamente. Por las razones descriptas anteriormente, esto es particularmente cierto cuando la intensidad del ejercicio asociada con el VO_{2max} se evalúa durante un test incremental continuo con etapas de corta duración.

El objetivo principal de este trabajo fue estimar la contribución del sistema anaeróbico con el tiempo hasta el agotamiento en $I_{VO_{2max}}$ (definido como la velocidad o potencia en la cual un atleta que está realizando ejercicio alcanza el VO_{2max}), analizando la relación entre el t_{LIM} y el déficit del oxígeno acumulado (AOD) seleccionado como un indicador de producción de energía anaeróbica (Hermansen y Medbø 1984; Medbø et al. 1988; Medbø y Tabata 1989, 1993). Dado que en el estudio participaron tres grupos diferentes de atletas de resistencia de medio y largo plazo (ciclistas, kayakistas y nadadores), un objetivo adicional del trabajo fue evaluar si existían diferencias relacionadas a la disciplina deportiva en el t_{LIM} y en otras características aeróbicas.

METODOS

Sujetos

En el estudio participaron en total 23 sujetos de sexo masculino, donde 8 sujetos eran ciclistas de ruta, 7 kayakistas de aguas tranquilas (1000 m) y 8 nadadores de media distancia (400 m). Los niveles de habilidad iban desde competidores de nivel nacional a ganadores de medallas de oro en los Juegos Olímpicos. Para cada subgrupo y para grupo completo de atletas, se obtuvieron los valores medios y desviaciones estándar de algunas características físicas y VO_{2max} por kilogramo de masa corporal y los datos obtenidos se presentan en la Tabla 1. Los atletas estaban totalmente familiarizados con los procedimientos de evaluación en el laboratorio y dieron su consentimiento informado antes de participar en el estudio. Se solicitó a los sujetos que no entrenaran durante las 12 h previas a las sesiones de laboratorio, pero se permitió entrenamiento leve 12-24 h previas. La ingesta de alimentos de los sujetos también fue estandarizada a lo largo de las 24 h previas para minimizar la variabilidad en la concentración de glucógeno muscular entre los tests. Cada sujeto realizó todos los tests en el mismo momento del día.

Variable	Grupo de Sujetos					
	Ciclistas (n=8)		*Kayakistas (n=7)*		*Nadadores (n=8)*	
	Media	SD	Media	SD	Media	SD
Edad (años)	24	2[a]	23	6	18	2
Talla (cm)	182	4	177	8	183	7
Masa Corporal (kg)	79	9	74	11	75	8
Consumo máximo de O_2 ($ml \bullet min^{-1} \bullet kg^{-1}$)	72	4[b]	55	4	60	4
Pendiente [c] ($ml \bullet min^{-1} \bullet W^{-1}$)	13,2	1,6	15,4	2,1	---	---
($ml \bullet min^{-1} \bullet kg^{-1} \bullet s^{3} \bullet m^{-3}$)	---	---	---	---	16,1	1,9
Ordenada al origen ($ml \bullet min^{-1} \bullet kg^{-1}$)	7,3	2,3	6,9	2,4	5,8	2,2
SEE[c] ($ml \bullet min^{-1} \bullet kg^{-1}$)	1,2	0,5	1,4	0,4	1,4	0,6
Coeficiente de correlación [c] *(r)*	0,995	0,003	0,991	0,006	0,994	0,003

***Tabla 1**. Características de los sujetos. n=Número de sujetos. En todos los tests los ciclistas realizaron ejercicios en una bicicleta ergométrica, los kayakistas en un ergómetro de brazos y los nadadores en un canal artificial de nado. [a] Los ciclistas tenían mayor edad que los nadadores, y esta diferencia era significativa P≤0,05. [b] Se observan diferencias significativas entre los valores de kayakistas y nadadores, P≤0,05. [c] Parámetros de la recta de regresión lineal calculados a través del promedio de las mediciones del consumo de oxígeno a lo largo de los últimos 60 s de cada intensidad submáxima.*

Ergómetros

Cada sujeto realizó ejercicios en un ergómetro específico para su disciplina. Los ciclistas pedalearon en una bicicleta ergométrica con freno electrónico (*Ergoline, Alemania*) qué fue modificada para permitirles a los atletas ajustar el asiento y el manubrio correctamente y utilizar sus zapatillas y pedales habituales de ciclismo. La bicicleta ergométrica producía una potencia constante independiente de frecuencia de pedaleo; sin embargo, se solicitó a los atletas que mantuvieran una cadencia de pedaleo de 95-100 rpm durante todas las pruebas. Los kayakistas fueron evaluados en un ergómetro de brazos con palanca o manubrio(Dal Monte, 1989) especialmente diseñados para simular la acción de palear. El ergómetro fue fijado en modo de potencia contante y los atletas realizaron ejercicio a 90 rpm, cerca de su frecuencia de competición. Los nadadores nadaron en un canal dónde el agua circulaba por un circuito mediante una hélice manejada con motor, lo que proporcionaba un flujo de agua que iba de 0 a 2 $m \cdot s^{-1}$ con incrementos de 0,01 $m \cdot s^{-1}$ (Dal Monte, 1989). Se permitió que los sujetos eligieran la frecuencia de nado propia.

Protocolo

El estudio tenía tres fases separadas, dos sesiones pre-test y una sesión de evaluación. Las sesiones estaban separadas por un mínimo de 3 días.

La primera sesión pre-test consistía en un test incremental continuo con etapas de 2 minutos que tenía como objetivo determinar el VO_{2max} y la mínima velocidad (nadadores) o potencia (ciclistas y kayakistas) en la que se alcanzaba el VO_{2max} ($I_{VO_{2max}}$). Las intensidades iniciales fueron 50 W para ciclistas y kayakistas y l,0 $m \cdot s^{-1}$ para nadadores. Los incrementos de intensidad fueron 50 y 30W para ciclistas y kayakistas, y 0,05 $m \cdot s^{-1}$ para nadadores. El VO_{2max} fue fijado como el punto en el cual los aumentos adicionales en la intensidad producían un incremento menor a 2,0 $mL.min^{-1}.kg^{-1}$ en el consumo de oxígeno (VO_2). Se asumió que la potencia o velocidad correspondiente era $I_{VO_{2max}}$. Si no era posible observar un plateau en el VO_2 menor a 2,0 $mL.min^{-1}.kg^{-1}$, la $I_{VO_{2max}}$ se calculaba utilizando una ecuación modificada de la ecuación propuesta por Kuipers et al. (1985):

$$I_{VO_{2max}} = I + \Delta I .(n /120)$$

Donde I es la intensidad de la última etapa cumplida (expresada en Watts o metros por segundo), ΔI es el incremento en la intensidad (Watts o metros por segundo) y n indica el número de segundos que el sujeto se ejercitó en la última etapa.

La segunda sesión de evaluación realizada antes del test consistió en un test incremental intermitente, con etapas de 5 min separadas por períodos de descanso, que se iban incrementando de 2 a 7 min, diseñado para recolectar los datos necesario para establecer una relación entre la intensidad del ejercicio y la demanda de O_2 para posteriormente, calcular el AOD. Las producciones de potencia y velocidad fueron seleccionadas en base a los resultados pre-test de VO_{2max} y tomaron valores que iban desde una intensidad de ejercicio inicial correspondiente a un VO_2 de aproximadamente 30% del VO_{2max} del individuo hasta una intensidad final correspondiente a valores de VO_2 que no superaban el 80% del VO_{2max}. El

procedimiento involucró una media de cinco intensidades submáximas (intervalo 4-6).

Finalmente, los sujetos realizaron un ejercicio de intensidad constante hasta el agotamiento en la $I_{VO_{2max}}$ determinada para cada individuo siguiendo la metodología descripta anteriormente, para establecer el t_{LIM} y recolectar los datos que permitirían calcular AOD. Después de una entrada en calor de 10-min en la cual se ajustó la intensidad del ejercicio para mantener el VO_2 en aproximadamente 60% de VO_{2max}, la intensidad del ejercicio de los sujetos aumentó progresivamente de modo que alcanzaran su $I_{VO_{2max}}$ en 30 s y luego mantenían esta intensidad hasta que se sintieran exhaustos. Los investigadores proporcionaron motivación verbal. El t_{LIM} se registró como el tiempo desde que se alcanzó por primera vez la $I_{VO_{2max}}$ hasta el punto en el que el atleta era incapaz de mantener la intensidad del ejercicio requerida. Para los ciclistas y kayakistas la prueba finalizaba cuando los sujetos eran incapaces de mantener 80 y 70 rpm respectivamente, a pesar del estímulo verbal. Sin embargo la mayoría de los sujetos interrumpió el ejercicio simplemente cuando estaban exhaustos. Todas las pruebas fueron realizadas con temperaturas ambientes de 20º a 23°C y temperatura del agua de 25° a 27°C.

Medición de VO_2, Frecuencia Cardíaca y Concentración de Lactato Sanguíneo

En todos los experimentos, el VO_2 y la frecuencia cardíaca (HR) fueron monitoreados constantemente con un equipo de telemetría portátil (*K2 Cosmed, Italia*) cuya precisión y confiabilidad en la medición de VO_2 fue evaluada en estudios previos (Dal Monte et al. 1989; Lucía et al. 1993; Peel y Utsey 1994). El K2 no mide concentración fraccionaria de dióxido de carbono en el aire expirado. Esto predispone al sistema a un error inherente en el cálculo de VO_2. Sin embargo, como se ha demostrado en los estudios de Peel y Utsey (1994) y Crandall et al. (1994) esta limitación no afecta los resultados de manera significativa. El sistema K2 consiste en una máscara facial que se utiliza para obtener muestras del aire expirado, una unidad de transmisión, un electrodo para registrar la HR, una batería, y una unidad receptora. La ventilación se midió con un flujómetro de turbina fotoeléctrico colocado en la máscara, mientras que la concentración de oxígeno se determinó en la unidad del transmisor mediante un electrodo polarográfico en miniatura. El peso total que el sujeto cargaba era aproximadamente 800 g. El VO_2 y HR fueron promediados cada 15 s.

Para medir la concentración máxima de lactato sanguíneo, se recolectaron muestras de sangre del lóbulo de la oreja antes, inmediatamente después y 3, 6 y 9 min después de cada test. La concentración de lactato sanguíneo se determinó mediante un sistema enzimático amperométrico (*Epphendorf-ESAT 6001, Alemania*).

Valores Calculados

Para cada sujeto se calculó el valor de VO_2 en $I_{VO_{2max}}$(O_2,e) mediante un método de extrapolación adaptado del procedimiento propuesto por Medbø et al. (1988). La relación entre VO_2 relativo y la intensidad del ejercicio se determinó promediando los valores de VO_2 de los últimos 60 s de cada etapa del segundo pre-test. Para cada sujeto se calculó la línea de mejor ajuste de los resultados obtenidos de las 4-6 intensidades sub-máximas y un valor constante de *y* de 5,1 $mL.min^{-1}.kg^{-1}$ en la intensidad de ejercicio cero, (que representa el VO_2 del sujeto parado; Scott et al. 1991) versus la intensidad del ejercicio (potencia o velocidad). Se observó que el VO_2 aumentó linealmente con la potencia en ciclistas y los kayakistas y con el cubo de la velocidad en los nadadores. En la Tabla 1 se presenta la pendiente, la ordenada al origen, el coeficiente de correlación de las ecuaciones de regresión y el error de estimación estándar para cada subgrupo. El O_2,e en $I_{VO_{2max}}$ fue estimado por extrapolación de la relación descripta previamente. Durante el test de t_{LIM}, la diferencia entre O_2,e y el VO_2 real, calculado para cada muestra de 15 s, fue acumuladacon el tiempo de ejercicio y se asume que el valor obtenido era AOD (O_2 en mililitros por kilogramo). El AOD también se calculó como porcentaje del VO_2 total (% AOD), calculado como el producto entre O_2,e y t_{LIM}.

Además de estos cálculos, se calculó para cada sujeto la relación porcentual entre la intensidad del ejercicio real usada y la intensidad del ejercicio que se asociaría con el VO_{2max} (evaluada usando la pendientey la ordenada al origen de la relación velocidad/potencia de VO_2 considerando al VO_2 igual a VO_{2max} y resolviendo la ecuación para velocidad o potencia).

La concentración de lactato sanguíneo máxima neta se calculó como la diferencia entre la concentración de lactato máxima post-ejercicio y la concentración de lactato al final de la entrada en calor.

Análisis Estadísticos

Para evitar el supuesto de que los datos obtenidos en las poblaciones en estudio seguían una distribución normal, utilizamos estadística no paramétrica. Las diferencias entre los tres sub-grupos fueron evaluadas con el análisis de la varianza de una vía por rangos de Kruskall-Wallis (muestras no relacionadas) y las diferencias entre los grupos fueron establecidas por comparaciones múltiples. Se usaron los coeficientes de correlación de Spearman para determinar el grado de asociación entre el t_{LIM} y los índices aeróbicos y anaeróbicos (VO_{2max}, AOD y % AOD). La significancia estadística se estableció en $P \leq 0,05$.

RESULTADOS

No se observaron diferencias significativas entre los subgrupos en las variables antropométricas seleccionadas. Los valores de VO_{2max} variaron de 50,5 a 78,2 $mL.min^{-1}.kg^{-1}$ y el valor medio de los ciclistas fue significativamente superior que los valores observados en nadadores y kayakistas.

Al observar las respuestas de VO_2 durante las sesiones de prueba del t_{LIM}, identificamos tres patrones de VO_2 típicos (Figura 1). El primero (Figura 1a) comenzó con un marcado aumento inicial y siguió incrementos continuos más lentos durante el resto del ejercicio. El segundo (Figura Ib), después del aumento inicial, se observó un *plateau* (meseta) durante el resto del ejercicio, mientras que en el tercero, (Figura 1c), después del aumento inicial, se observa un *platau* temporal y luego un segundo incremento. La ocurrencia de los diferentes patrones aparentemente no sería grupo-dependiente. Por ejemplo, el patrón en el la Figura 1a se observó en 3 ciclistas, 2 kayakistas y en 2 nadadores, mientras que el patrón representado en la Figura 1b se observó en 3 ciclistas, 3 kayakistas y 3 nadadores. Una observación visual de las gráficas individuales de O_2 en función del tiempo de ejercicio, sugiere que existe una tendencia de una relación entre la duración del ejercicio y la ocurrencia del modelo en la Figura 1a. De hecho, todos los sujetos que presentaron este modelo realizaron ejercicio durante menos de 200 seg en el test de M.. De manera contraria, no se encontró ninguna relación entre la presencia de los patrones anteriores y la relación porcentual entre la intensidad del ejercicio real y la que se asociaría con el VO_{2max}.

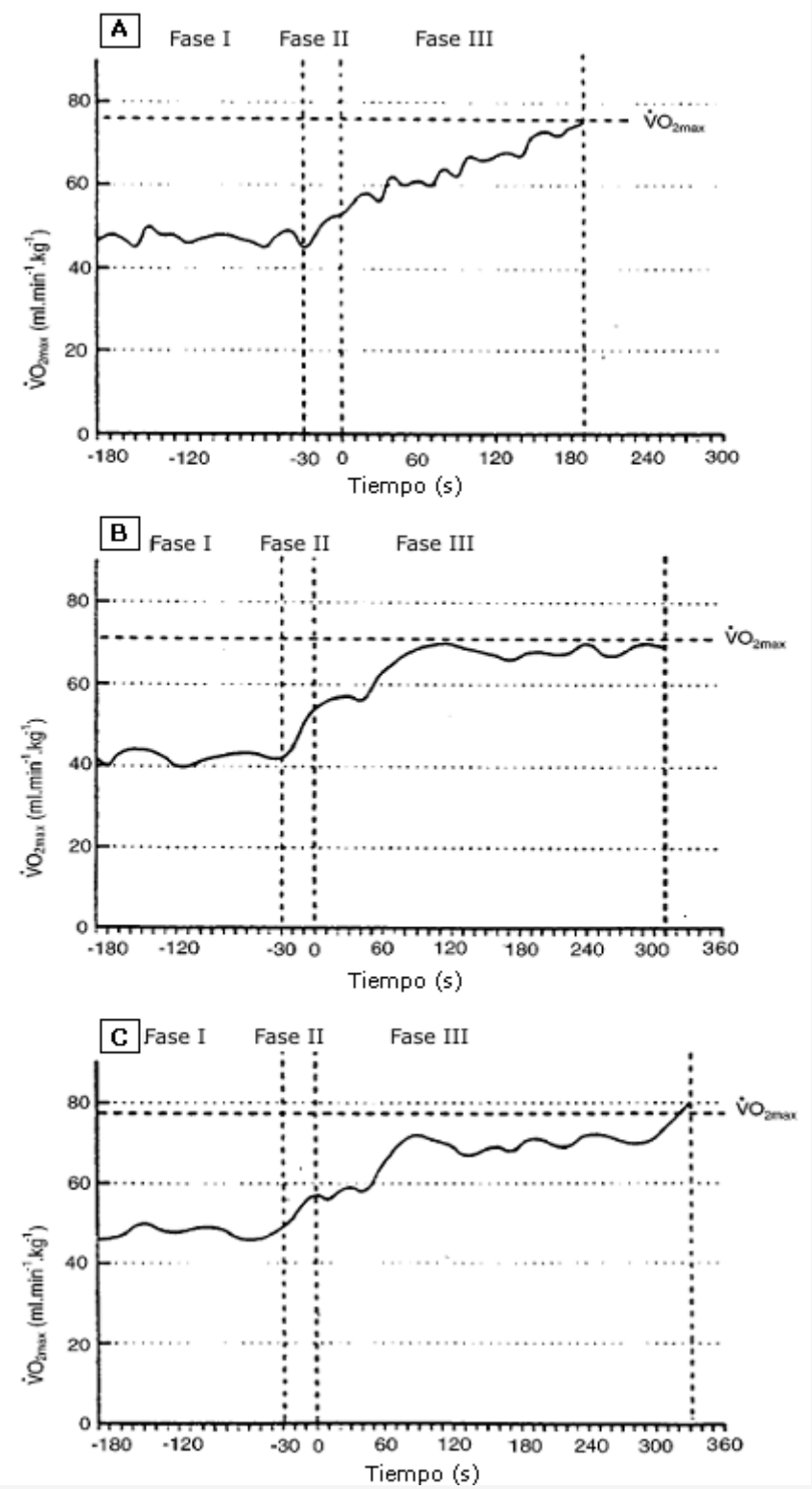

Figura 1 *a, b y c. Ejemplo de los tras patrones típicos de consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}) observados en los sujetos de este estudio durante el test de t_{LIM}, t_{LIM}: tiempo hasta el agotamiento en intensidad de ejercicio que produce el VO_{2max}. Las fases I, II y III, equivalen a fase de entrada en calor, fase de transición y fase de t_{LIM}, respectivamente.*

La relación porcentual media entre la intensidad del ejercicio real usada y la intensidad del ejercicio que se asociaría con el VO_{2max} fue 108 % (SD 3), 107 % (SD 2), 105% (SD 2), para ciclistas, kayakistas y nadadores, respectivamente. En todos los sujetos, los valores individuales variaron de 102% a 112% [media 107 %(SD 3)] con un coeficiente de variación de 2,6%. Los valores de media y desviación estándar para la intensidad del ejercicio, t_{LIM}, AOD, % AOD en ciclistas, kayakistas,

nadadores y en el grupo entero de sujetos se presentan en la Tabla 2. Además, se presentan los valores medios y las desviaciones estándar para el consumo de oxígeno acumulado medido durante el test de t_{LIM} para cada subgrupo. Tomando a todos los sujetos en conjunto, el t_{LIM} varió de 122 s a 570 s con un valor medio de 291 s (SD 130) mientras que AOD y % AOD tomaron valores que iban de 26,4 $mL.kg^{-1}$ a 83,6 $mL.kg^{-1}$ y de 8,9% a 24,1%, respectivamente. Cuando cada subgrupo fue considerado por separado, sólo se observaron diferencias significativas entre los valores de t_{LIM} entre kayakistas y ciclistas ($p \leq 0,02$). Se observarondiferencias significativas en los valores de AOD entre nadadores y kayakistas y entre nadadores y ciclistas, y los valores más altos y más bajos se observaron en nadadores y kayakistas, respectivamente. Cuando los valores de AOD fueron expresados como % AOD, se observaron diferencias significativas de grupo entre kayakistas y nadadores y entre kayakistas y ciclistas.

Grupo de Sujetos	I_{VO2max}		t_{LIM} (s)		AO_2($mL \cdot kg^{-1}$)		AOD (mL $O_2.kg^{-1}$)		%AOD (%)	
	Media	*SD*	*Media*	*SD*	*Media*	*SD*	*Media*	*SD*	*Media*	*SD*
Ciclistas (n = 8)	421	44 (W)	225	94	244	68	43,6	12	16	4
	5,5	1 ($W.kg^{-1}$)								
Kayakistas (n = 7)	247	58 (W)	356	85[a]	302	75	40,2	10	11,5	3[c]
	3,4	1 ($W.kg^{-1}$)								
Nadadores (n = 8)	1,54	0,1 ($m.s^{-1}$)	302	136	265	76	56,4	16[b]	16,8	5
Todos los sujetos (n = 23)			291	130	263	83	45,9	19	15,2	7

Tabla 2. *Valores medios de la intensidad de ejercicio, tiempo hasta el agotamiento (t_{LIM}), en la intensidad de ejercicio que permite alcanzar el consumo de oxígeno máximo durante el test incremental continúo ($I_{VO_{2max}}$) y déficit acumulado de oxígeno absoluto y relativo (AOD). n=número de sujetos de sujetos, AO_2= Consumo de oxígeno acumulado durante el test de t_{LIM}; % AOD= déficit acumulado de oxígeno expresado como un porcentaje del gasto energético total.* [a] *Presenta diferencias significativas con el valor hallado en los ciclistas $P \leq 0,05$.* [b] *Se observan diferencias significativas entre los valores de ciclistas y kayakistas $P \leq 0,05$.* [c] *Se observan diferencias significativas entre los valores de ciclistas y nadadores $P \leq 0,05$.*

En las Figuras 2, 3 y 4 se presentan las relaciones entre el t_{LIM} y VO_{2max}, AOD y % AOD, en forma de diagrama de puntos para cada uno de los subgrupo y para todos los sujetos juntos, mientras que los coeficientes de correlación relacionados se presentan en la Tabla 3. Al considerar todos los sujetos juntos se observó que el t_{LIM} presentaba una correlación positiva y significativa con AOD y una correlación negativa y significativa con el VO_{2max}. Además se observó una correlación negativa con % AOD pero la misma no fue estadísticamente significativa. Si los tres subgrupos son considerados por separado, se observa que t_{LIM} y el VO_{2max} solo se correlacionaron significativamente en los ciclistas ($p \leq 0,02$). Además, para cada uno de los subgrupos, se encontraron correlaciones positivas entre los valores de t_{LIM} y AOD, y en ciclistas, ($p \leq 0,02$) y nadadores ($p \leq 0,02$) estas correlaciones fueron estadísticamente significativas mientras que las relaciones entre el t_{LIM} y % AOD no fueron estadísticamente significativas. En cada subgrupo por separado y para todos los sujetos en conjunto, no se observó ninguna correlación significativa entre el t_{LIM} y las relaciones porcentuales entre la intensidad del ejercicio real y la intensidad que se asociaría con el VO_{2max} ($r = -0,26$), siendo los ciclistas el grupo que presentó la mayor correlación negativa ($r=-0,46$).

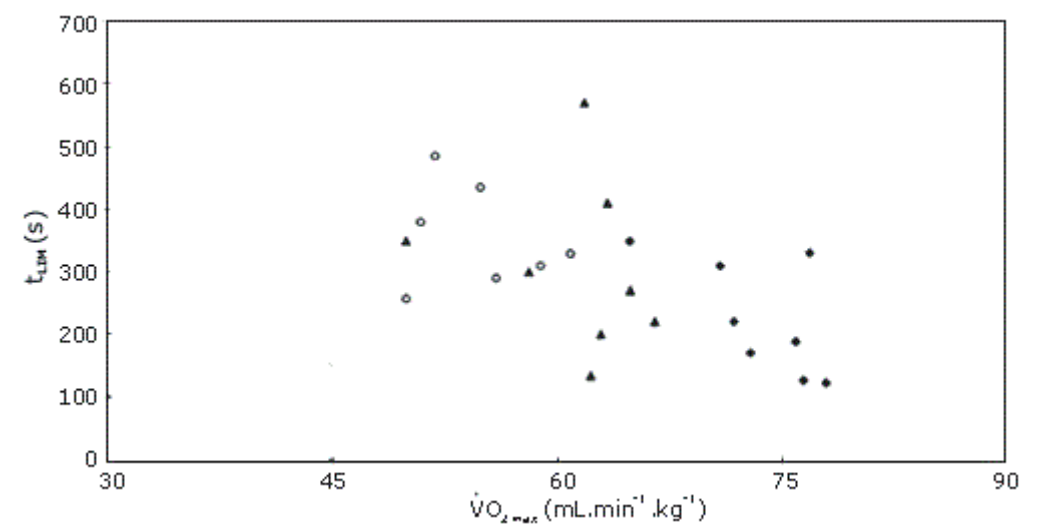

Figura 2. *Diagrama de puntos de t_{LIM} y VO_{2max}.♦: Ciclistas (n=8), ○: kayakistas (n=7), ▲: nadadores (n=8). Para definiciones ver Figura 1.*

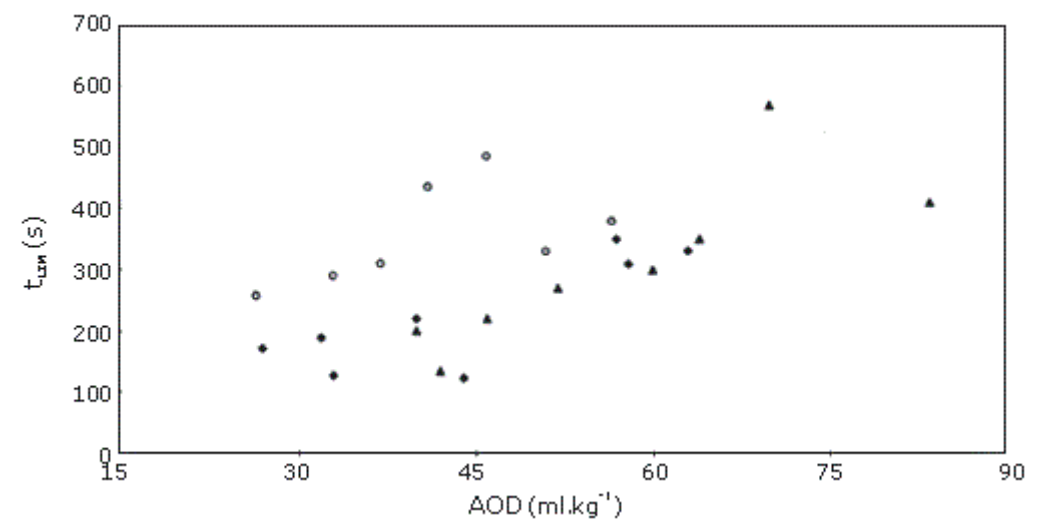

Figura 3. *Diagrama de puntos de t_{LIM} y AOD. ♦: Ciclistas (n=8), ○: kayakistas (n=7), ▲: nadadores (n=8). Para definiciones ver Figura 1 y Tabla 2.*

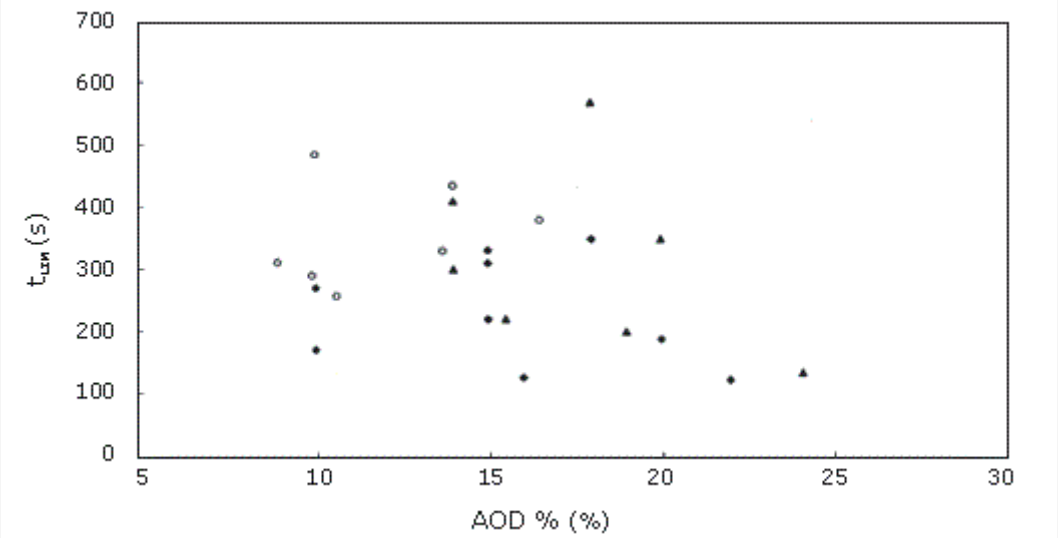

***Figura 4**. Diagrama de puntos de t_{LIM} y % AOD. ♦: Ciclistas (n=8), ○: kayakistas (n=7), ▲: nadadores (n=8). Para definiciones ver Figura 1 y Tabla 2.*

Variable	Ciclistas (n=8)	Kayakistas (n=7)	Nadadores (n=8)	Todos los sujetos (n=23)
	t_{LIM} (s)			
VO_{2max} (mL.min^{-1}.kg^{-1})	-0,68[a]	-0,18	-0,27	-0,46[a]
AOD (mL O_2.kg^{-1})	0,79[a]	0,55	0,81[a]	0,62[a]
% AOD (%)	-0,15	0,21	-0,22	-0,18

***Tabla 3**. Coeficientes de correlación entre el tiempo hasta agotamiento en $I_{VO_{2max}}$, (t_{LIM}) y el consumo máximo de O_2 (VO_{2max}) y las mediciones absolutas y relativas de AOD, para cada subgrupo y para el grupo entero de sujetos. Para las definiciones ver la Tabla 2. [a] $p \leq 0,05$.*

DISCUSION

Utilizando tres grupos de atletas altamente entrenados, este trabajo fue realizado principalmente para evaluar la influencia de los procesos anaeróbicos sobre el rendimiento de t_{LIM} en la intensidad utilizada cuando el VO_{2max} se obtiene a partir de un test incremental continuo. Como señalamos en la introducción, la intensidad de ejercicio que nosotros usamos durante el test de t_{LIM} fue diferente a la utilizada por algunos otros autores (di Prampero 1986; Lacour et al. 1991), la cual representa intensidades de ejercicio que podrían mantenerse aeróbicamente sin contribución anaeróbica. Nosotros elegimos la presente definición de $I_{VO_{2max}}$ porque es la intensidad de ejercicio que realmente utilizan los atletas de élite durante el entrenamiento, cuando el objetivo es alcanzar y mantener el VO_{2max}.

Al analizar los valores individuales de t_{LIM} y AOD se observó una gran dispersión de tiempos y valores. Estos resultados son bastante similares a los observados en algunos trabajos previos que reportaron gran variabilidad entre sujetos en estas dos variables, en grupos homogéneos de sujetos (Medbø et al. 1988; Graham y McLellan 1989; Bangsbo et al. 1993; Billat et al. 1994a, b). En el presente estudio la fuente principal de variación podría encontrarse en el protocolo utilizado para fijar la intensidad del ejercicio en el test de t_{LIM}. De hecho, como mencionamos anteriormente, cada sujeto realizó ejercicios en la intensidad real que permitió alcanzar el VO_{2max} obtenida durante un test incremental continuo con etapas de 2 min (aun cuando para algunos sujetos podría no ser exactamente cierto porque utilizamos la ecuación de Kuipers et al. (1985) para calcular la intensidad de ejercicio final). Debido a la contribución de los procesos anaeróbicos en este tipo de tests cuando se alcanza el VO_{2max}, en esta intensidad la liberación de energía es diferente de la energía que se asociaría con el VO_2 si no

hubiera ninguna contribución anaeróbica (los sujetos de nuestro estudio realizaron ejercicios a una intensidad de ejercicio real que iba de 102,6% a 112,8% de la que se asociaría con su VO_{2max}), el valor de la diferencia se basa principalmente en las características del sujeto durante el ejercicio anaeróbico.

Por lo tanto, como demostraron Medbø y Tabata (1989), el tiempo hasta el agotamiento depende en gran parte de la relación entre la intensidad del ejercicio real y la intensidad que estaría asociada con VO_{2max}, la variabilidad anterior puede haber influido marcadamente en la variación de los valores de t_{LIM} que observamos en este estudio. De manera contraria, con respecto a la variabilidad de AOD, dado que se ha demostrado (Medbø et al. 1988) que AOD permanece sin cambios durante el ejercicio de alta intensidad de 2-16 minutos de duración, el hecho que nuestros sujetos realizaran los ejercicios durante períodos de tiempo diferentes habría sido sólo un problema menor. Esto sería así, aunque se ha demostrado que algunos de los errores del método de AOD son proporcionales a la duración del ejercicio lo que podría haber agregado una fuente adicional de variación (Medbø et al. 1988).

Según Medbø et al. (1988) quienes demostraron que para maximizar AOD se necesita una intensidad de ejercicio constante agotadora de 2 min de duración, nuestros sujetos deben de haber alcanzado su AOD máximo durante el test de t_{LIM} (tiempo del ejercicio entre 2 y 9 min). No obstante, los valores medios de AOD obtenidos en nuestro estudio son más bajos que los que han sido informados en algunos trabajos previos (Medbø et al. 1988; Scott et al. 1991; Bangsbo et al. 1993; Craig et al. 1993). Esto es particularmente cierto para ciclistas y kayakistas.

Dejando de lado las diferencias en el tipo de atleta, algunos factores metodológicos podrían haber disminuido nuestros valores de AOD absolutos. En primer lugar, contrariamente al procedimiento comúnmente utilizado para calcular el AOD máximo, nuestros sujetos realizaron el test hasta el agotamiento con una salidarápida**,** inmediatamente después de la entrada en calor de 10 min. En muchos sujetos esto produjo valores de VO_2 superiores al 60% de VO_{2max} al comienzo del test de t_{LIM}. Dado que los valores de AOD surgían de la diferencia entre el VO_2 estimado y el VO_2 real, mientras más alto haya sido el valor de VO_2 más bajo sería el AOD calculado. En nuestra opinión, éste fue el factor que disminuyó en mayor grado los valores finales de AOD, en comparación con otros protocolos. En segundo lugar, el AOD en este estudio no fue ajustado para la contribución de las reservas de oxígeno del cuerpo con la provisión de energía (qué se estima, sería aproximadamente 10% de AOD, Medbø et al. 1988). Sin embargo, dado que nuestros sujetos comenzaron el test de t_{LIM} en una intensidad de aproximadamente 60% de VO_{2max}, probablemente la mayor parte de las reservas de O_2 fueron utilizadas durante la entrada en calor. Por consiguiente, este hecho debería haber disminuido nuestros valores de AOD sólo marginalmente. Finalmente, en aquellos sujetos cuya intensidad de ejercicio estaba muy cerca de la intensidad que correspondía al VO_{2max}, a medida que el ejercicio progresaba sus VO_2 se volvieron realmente superiores a la demanda de oxígeno calculada para su producción de potencia o velocidad (Ver Figura 1a, b). Esto provocó un déficit de oxígeno matemáticamente negativo para este intervalo de tiempo, lo que disminuyó ligeramente el cálculo final de AOD. Cuando se excluyeron los valores negativos de AOD del cálculo, nuestros valores de AOD se incrementaron a un valor medio de 47,8 $mL.kg^{-1}$.

En la metodología de AOD, la precisión de las estimaciones de la demanda de O_2 de ejercicios por encima del VO_{2max}, a partir de mediciones submáximas de VO_2 es un punto crítico. En este estudio, debido a los inconvenientes de tiempo, se utilizó un procedimiento simplificado del propuesto por Medbø et al. (1988) para estimar la pendiente y la ordenada al origen de la regresión VO_2 vs. velocidad/potencia, se utilizó un protocolo discontinuo con un promedio de cinco intensidades submáximas (comprendidas entre 4 y 6) de 5 min. Las relativamente pocas determinaciones de VO_2 en las diferentes intensidades submáximas no serían un problema para establecer una relación confiable de VO_2-velocidad/potencia, ya que en la regresión se incluyó un valor constante de *y* de 5,1 $mL.min^{-1}.kg^{-1}$ en la intensidad de ejercicio igual a cero (Scott et al. 1991). El efecto de la inclusión de este valor fue aumentar el coeficiente de correlación y disminuir significativamente el error estándar de la media de las regresiones. Nosotros interpretamos que este procedimiento permitía un mejor ajuste a los datos y por consiguiente decidimos incluir el valor en el cálculo. Para la mayoría de los sujetos esta operación produjoun aumento en la pendiente de la regresión y en la demanda de O_2.

Dado que se ha demostrado que a intensidad de ejercicio submáxima el VO_2, continúa aumentando a medida que el ejercicio progresa (Bangsbo 1992), la elección de intensidades submáximas de 5 min tenía como objetivo eliminar la influencia del fenómeno de deriva de oxígeno que puede asociarse con mayores duraciones y aún permite obtener una medición confiable del costo de oxígeno. De hecho, tal como observaran Green y Dawson (1995), los valores del estado estable normalmente se alcanzan dentro de los 4 min de realizar ejercicios a intensidad moderada. Esto también sería el caso de nuestro estudio. De hecho, el análisis de la respuesta de VO_2 durante el test incremental, no reveló ninguna diferencia significativa entre los valores de VO_2 medidos durante el 4to y 5to min en cada etapa. Sin embargo, en nuestro procedimiento, sólo se utilizaron los valores de VO_2 del último minuto para determinar el costo energético asociado con cada intensidad. Tal como observaran Gastin y Lawson (1994), esto podría haber producido una incapacidad para evaluar con precisión, si se había alcanzado el estado estable y en que valor de VO_2 ocurrió eventualmente. Si bien este procedimiento ha sido utilizado previamente en varios estudios, este punto debe ser investigado adicionalmente, ya que

Gastin y Lawson (1994) reportaron una reducción consistente en el error estándar de estimación de la media de los valores de VO_2 en estado estable cuando se utilizaba una curva de ajuste de la curva acumulada de los gases expirados respiración por respiración.

La correlación entre el t_{LIM} y VO_{2max} arrojó un coeficiente r=-0,46 lo que sugiere que los bajos niveles de producción de potencia aeróbica pueden estar asociados con elevados valores de t_{LIM}. Este punto coincide con los resultados de Billat et al. (1994 c), quienes demostraron que el tiempo de carrera hasta el agotamiento a la $I_{VO_{2max}}$ está relacionado inversamente con el VO_{2max} en corredores de élite. Una posible explicación sería que algunos sujetos tuvieron que realizar ejercicio en intensidades relativamente más altas para cumplir con el criterio aplicado en este estudio para VO_{2max}, aun cuando nuestro valor de corte (2,0 $mL.min^{-1}.kg^{-1}$) no era particularmente restrictivo. En el siguiente test hasta el agotamiento, estos sujetos no habrían podido realizar ejercicio durante mucho tiempo a la intensidad apropiada. Si éste fuera el caso, se esperaría una correlación negativa entre la intensidad de ejercicio relativa al VO_{2max} y la duración del ejercicio. Sin embargo, cuando se analizaron todos los sujetos juntos, sólo se observó una débil correlación negativa (r = -0,26).

Una aclaración final en este punto apoyará parcialmente la explicación anterior. Los datos indicaron que los ciclistas eran el único grupo que explicaba la relación inversa entre t_{LIM} y VO_{2max} observada para el grupo entero de atletas. Este grupo también mostró la mayor correlación negativa (r = -0,46) entre el t_{LIM} y la relación porcentual entre la intensidad de ejercicio real y la intensidad del ejercicio que se asociaría con VO_{2max}. Las diferencias en los tipos de ejercicio pueden aportar una explicación para las diferencias entre los ciclistas y los atletas de los otros dos grupos. En los ciclistas hay una participación menor del ciclo de estiramiento-acortamiento que en nadadores y kayakistas. Tal como demostraran Nicol et al. (1991), la fatiga de estiramiento-acortamiento puede inducir variaciones en la fuerza y eficacia del movimiento, lo que podría provocar agotamiento.

El t_{LIM} se correlacionó de manera positiva con AOD (r = 0,62), lo que indica a mayor AOD, mayores serán los rendimientos en t_{LIM}. En contraste, no se observó ninguna correlación significativa entre el t_{LIM} y el % AOD (r = 0,23). Esto sugeriría que se producen incrementos en la cantidad de liberación de energía anaeróbica cuando se incrementa la duración del ejercicio, pero al considerar el fenómeno en términos relativos, el papel de los procesos anaeróbicos parecería ser independiente del tiempo. Como señalamos antes, los valores de AOD obtenidos por nuestros sujetos deben haber estado cerca de su AOD máximo y por lo tanto cerca de su capacidad anaeróbica. En tal caso, una explicación para la correlación positiva entre el t_{LIM} y AOD podría ser la siguiente. Durante el test hasta el agotamiento la energía fue aportada principalmente por los procesos aeróbicos mientras los procesos anaeróbicos aportaron un suplemento. Cuando la capacidad anaeróbica se agotó, la energía en forma de adenosin trifosfato (ATP) sólo podía ser proporcionada por los procesos aeróbicos. Dado que estos procesos no pueden proporcionar ATP a una velocidad tan alta como la requerida por la intensidad del ejercicio en cuestión, el sujeto se agotaba y el test finalizaba. Los sujetos con mayor capacidad anaeróbica, siempre que los otros factores importantes fueran similares, fueron capaces de realizar ejercicios durante un tiempo más largo que los sujetos con una capacidad anaeróbica menor.

Finalmente, al comparar los diferentes sub-grupos, los nadadores de media distancia presentaron una tendencia a completar el test de t_{LIM} con la mayor proporción de trabajo anaeróbico mientras que los ciclistas presentaron los valores de t_{LIM} más bajos y el VO_{2max} más alto. Por otro lado, los kayakistas pudieron realizar ejercicio durante un tiempo mayor a $I_{VO_{2max}}$, tuvieron el menor VO_{2max} y produjeron un porcentaje mayor de energía aeróbicamente. Tal como sugirieran numerosos informes, que encontraron valores de AOD consistentemente más altos en carreras en cinta rodante que los medidos durante ciclismo (Medbø y Tabata 1989; Medbø y Buergers 1990), las diferencias de AOD entre los subgrupos pueden ser explicadas principalmente por las diferencias en la cantidad de masa muscular reclutada durante el ejercicio, que a su vez es una función del tipo de ejercicio. Si es así, aunque nosotros no sabemos exactamente cuales músculos estaban trabajando, y hasta qué punto los mismos habían estado comprometidos en las actividades deportivas de nuestros sujetos, el mayor valor de AOD encontrado en los nadadores podría deberse a una mayor musculatura reclutada durante la natación en comparación con el kayak y el ciclismo. Otro factor que puede haber participado en la aparición de diferencias entre los grupos es el diferente nivel de entrenamiento de los atletas dentro de cada subgrupo. En su trabajo, Medbø y Burgers (1990) concluyeron que la capacidad anaeróbica depende de los antecedentes de entrenamiento y puede aumentar por medio del entrenamiento apropiado.

En síntesis, los resultados de este estudio proporcionaron evidencia del rol de los procesos anaeróbicos en el rendimiento de t_{LIM} en $I_{VO_{2max}}$. Aun cuando una correlación significativa no demuestra la existencia de una relación causal, la confirmación de esto requiere nuevos enfoques en las investigaciones, el t_{LIM} se correlacionó positivamente con AOD y negativamente con el VO_{2max}. Se observaron diferencias significativas entre los grupo en algunas de las variables estudiadas, aunque las razones para tales diferencias no pudieron ser aclaradas con nuestros datos, dada la gran cantidad de factores fisiológicos y metodológicos involucrados.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Dr II Medbø por sus comentarios y sugerencias editoriales. También desean agradecer a F. Sardella, C. Marini, F. Fanton y P. Faccini por su ayuda técnica especializada durante las pruebas. Este estudio fue financiado por subsidios de CONI (Comité Olímpico Nacional Italiano) y Caja Central de Actividades Sociales de Electricidad y Gas de Francia.

REFERENCIAS

1. Bangsbo J (1992). Is the 02 déficit an accurate quantitative measure of the anaerobic energy production during intense exercise? (Letters to the editor). *J Appl Physiol 73:1207-1208*
2. Bangsbo J, Michlsik L, Petersen A (1993). Accumulated Oz déficit during intense exercise and muscle characteristics of élite athletes. *Int J Sports Med 14:207-213*
3. Billat V, Pinoteau J, Petit B, Renoux JC, Koralsztein JP (1994). Reproducibility or running time to exhaustion at F02max in sub-elite runners. *Med Sci Sports Exerc 26:254-257*
4. Billat V, Pinoteau J, Petit B, Renoux JC, Koralsztein JP (1994). Time to exhaustion at 100% of velocity at F02max and modelling of the relation time-limit/velocity in élite long distance runners. *Eur J Appl Physiol 69:271-273*
5. Billat V, Pinoteau J, Petit B, Bernard O, Koralsztein JP (1994). Time to exhaustion at F02max and lactate steady state velocity in sub-elite long distance runners. *Arch Int Physiol Biochim 102:215-219*
6. Craig NP, Norton KI, Bourdon PC, Woolford SM, Stanef T, Squires B, Olds TS, Conyers RAJ, Walsh CB (1993). Aerobic and anaerobic índices contributing to track endurance cycling performance. *Eur J Appl Physiol 67:150-158*
7. Crandall CG, Taylor SL, Raven PB (1994). Evaluation of the Cosmed K2 portable telemetric oxygen uptake analyzer. *Med Sci Sports Exerc 26:108-111*
8. Dal Monte A (1989). Specific ergometry in the functional assess-ment of top class sportsmen. *J Sports Med Phys Fitness 29:4-8*
9. Dal Monte A, Faina M, Leonardi LM, Todaro A, Guidi G, Petrelli (1989). Máximum oxygen consumption by telemetry. *Scuola dello Sport Rivista di Cultura Sportiva. Comitato Olímpico Nazionale Italiano 15:35-44*
10. di Prampero PE (1986). The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med 7:55-72*
11. Gastin PB, Lawson DL (1994). Influence of training status on maximal accumulated oxygen déficit during all-out cycle exercise. *Eur J Appl Physiol 69:321-330*
12. Graham KS, McLellan TM (1989). Variability of time to exhaustion and oxygen déficit in supramaximal exercise. *Aust J Sci Med Sport 21:11-14*
13. Green S, Dawson BT (1995). The oxygen uptake-power regression in cyclists and untrained men: implications for the accumulated oxygen déficit. *Eur J Appl Physiol 70:351-359*
14. Hermansen L, Medbo JI (1984). The relative significance of aerobic and anaerobic processes during maximal exercise of short duration. *Med Sport Sci 17:56-67*
15. Hill DW, Rowell AL (1996). Running velocity at F02max. *Med Sci Sports Exerc 28:114-119*
16. Houmard JA, Costill DL, Mitchell JB, Park SH, Chenier TC (1991). The role of anaerobic ability in middle distance running performance. *Eur J Appl Physiol 62:40^13*
17. Kuipers H, Verstappen FTJ, Keize HA, Guerten P, van Kranen-burg G (1985). Variability of aerobic performance in the labo-ratory and its physiologic correlates. *Int J Sports Med 6:197-201*
18. Lucia A, Fleck SJ, Gosthall RW, Kearney JT (1993). Validity and reliability of the Cosmed K2 instrument. *Int J Sports Med 14:380-386*
19. Nicol C, Komi PV, Marconnet P (1991). Fatigue effect of marathón running on neuromuscular performance. II. Changes in forcé, integrated electromyographic activity and endurance capacity. *Scand J Med Sci Sports 1:18-24*
20. Peel C, Utsey C (1994). Oxygen consumption using the K2 telemetry system and a metabolic chart. *Med Sci Sports Exerc 25:396-400*
21. Scott CB, Roby FB, Lohman TG, Bunt JC (1991). The maximally accumulated oxygen déficit as an indicator of anaerobic capacity. *Med Sci Sports Exerc 23:618-624*

Cita Original

Faina M., V. Billat, R. Squadrone, M. De Angelis, J.P. Koralsztein and A. Dal Monte. Anaerobic Contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclists, kayakists and swimmers. Eur J Appl Physiol; 76: 13-20, 1997.