

EVOLUCIÓN DE LOS PARÁMETROS ERGOESPIROMÉTRICOS CON EL ENTRENAMIENTO EN DEPORTISTAS

EVOLUTION OF THE ERGOSPIROMETRIC PARAMETERS WITH TRAINING IN ATHLETES

**Pedro J.
Benito**

**Ana B.
Peinado**

**Víctor Díaz
Molina**

**Irma
Lorenzo
Capellá**

**Francisco
J. Calderón**

Facultad de
Ciencias de la
Actividad
Física y del
Deporte
INEF-Madrid
Universidad
Politécnica de
Madrid

INTRODUCCIÓN

La ergoespirometría es una técnica ampliamente utilizada para valorar los efectos del entrenamiento de resistencia tanto en la población sedentaria como en personas con una condición física moderada¹⁻³. La modificación del VO_2 máximo y de los umbrales ventilatorios es muy variable^{2,4,5}, pues depende del nivel de resistencia previo y de las características del programa de entrenamiento (intensidad, frecuencia, duración). Es objetivo de esta revisión analizar la evolución de los parámetros más representativos de una prueba de esfuerzo a medio o largo plazo. La importancia de esta revisión radica en dos cuestiones relevantes:

- ¿Se producen cambios ergoespirométricos durante una temporada o diversas temporadas en personas con un dilatado historial de entrenamiento?
- ¿Tienen suficiente sensibilidad las técnicas de ergoespirometría para evaluar la resistencia en personas altamente entrenadas?

Esta revisión tiene su punto de partida en el proceso de adaptación en personas sedentarias o moderadamente entrenadas. En este epígrafe, además de exponer “los márgenes de adaptación”, se analizan los factores fisiológicos que explican la mejora en los parámetros ergoespirométricos. El objetivo de éste epígrafe es conocer las “posibilidades” teóricas de adaptación.

A continuación se exponen los resultados de los estudios que han intentado justificar el mejor rendimiento deportivo en personas entrenadas o muy entrenadas. Para ello, hemos realizado una búsqueda restringida en la base de datos medline y en la base de datos sobre tesis doctorales publicadas en España (Teseo). Hemos introducido en la base de datos medline la siguiente frase de búsqueda: “(longitudinal OR long term OR longitudinal study) AND (anaerobic threshold OR lactate threshold OR ventilatory threshold) AND (training) NOT (clinical OR clinically OR disturbances OR injury OR injuries OR abnormalities OR pathological)”. En la base de datos de tesis doctorales publicadas en España (Teseo, Ministerio de Educación y Ciencia) se han introducido en título/resumen los términos relacionados con deportes de resistencia (*atletismo, ciclismo, remo, piragüismo, triatlón*). Finalmente, se realiza una visión crítica de los instrumentos de medición utilizados en ergoespirometría.

ADAPTACIÓN DE LOS PARÁMETROS ERGOESPIROMÉTRICOS EN LA POBLACIÓN SEDENTARIA O MODERADAMENTE ENTRENADA

Magnitud de los cambios

En general, las diferencias observadas a consecuencia del ciclo entrenamiento-desentrenamiento o viceversa, oscilan desde un 4% hasta un 33 %^{2,3}. Los cambios en el VO_2 máximo son

CORRESPONDENCIA:

Francisco Javier Calderón Montero
Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte (INEF-Madrid). Universidad Politécnica de Madrid
C/ Martín Fierro s/n. Madrid 28040
E-mail: franciscojavier.calderon@upm.es

Aceptado: 30.01.2007 / Revisión nº 201

muy variables, pues dependen de: estado previo de entrenamiento, programa de entrenamiento (intensidad, duración, frecuencia y método) y herencia.

- Estado previo de entrenamiento. El valor inferior de mejora del VO_2 máximo nos da idea de las "posibilidades" y el tiempo que se tarda en recuperar o mejorar los valores previos, es decir la velocidad con la que se produce la adaptación biológica.

El valor máximo observado resultó de un estudio realizado con personas que voluntariamente permanecían en la cama durante 20 días consecutivos y después realizaban un programa de entrenamiento². En el mismo estudio², a los 40-50 días aproximadamente todos los sujetos habían alcanzado o superado sus valores previos. No obstante, la velocidad de recuperación o mejora del VO_2 igualmente dependía del estado previo, pues los sujetos previamente sedentarios aumentaban más rápidamente (a los 10 días) que los activos o moderadamente activos, después de iniciado el programa de entrenamiento.

- Programa de entrenamiento. En general, dado que la mayor parte de los estudios tenían claramente un objetivo médico y no de entrenamiento, se concretan de forma poco clara las pautas de entrenamiento. En general, el entrenamiento que se sigue en la mayor parte de los estudios con personas sedentarias o moderadamente entrenadas, presenta las siguientes características^{2,3}: continuo, duración limitada (30 a 45 minutos), intensidad baja (alcanza en casos excepcionales el 80 % del VO_2 máximo) frecuencia baja (3 a 4 veces/semana) y tiempo limitado del programa (12 a 16 semanas)
- Herencia. Mediante los estudios con gemelos de igual o distinta carga genética, se estimó que la herencia por sí misma podría explicar el 93 % de las diferencias observadas en la potencia aeróbica. Con el desarrollo del genoma se piensa que este porcentaje es el

límite superior de la determinación genética de éste parámetro ergoespirométrico. Los numerosos genes relacionados con el rendimiento de resistencia hacen difícil conocer con precisión el límite inferior.

Mecanismos fisiológicos que pueden explicar la adaptación al entrenamiento

Los cambios producidos han sido atribuidos a diferentes mecanismos fisiológicos⁶⁻¹¹. Al ser el VO_2 un parámetro integrador, es muy complejo conocer cuales son los mecanismos responsables de la adaptación con el entrenamiento. Por este motivo, la mayor parte de los estudios experimentales han abordado parcialmente los mecanismos fisiológicos.

Despejando el VO_2 en la ecuación de Fick para la determinación del gasto cardiaco, se obtiene una ecuación conceptualmente muy útil para comprender el significado de éste parámetro (ecuación 1):

$$\text{VO}_2 = Q \times ([\text{O}_2]_{\text{arterial}} - [\text{O}_2]_{\text{venoso}}) = Q \times \text{Dif A-V O}_2.$$

Por otra parte, si se considera que V_E es igual a V_I , la ecuación para la determinación del VO_2 mediante el análisis del gas espirado ($\text{VO}_2 = (\dot{V}_I \times F_I \text{O}_2) - (V_E \times F_E \text{O}_2)$) puede simplificarse como sigue (ecuación 2):

$$\text{VO}_2 = V_E (F_I \text{O}_2 - F_E \text{O}_2).$$

Las dos ecuaciones por separado dan una gran información sobre los mecanismos fisiológicos que pueden explicar las modificaciones del VO_2 con el entrenamiento¹², pero si se igualan se obtiene una buena aproximación conceptual de los parámetros que afectan al VO_2 ¹² (ecuación 3):

$$V_E (F_I \text{O}_2 - F_E \text{O}_2) = Q \times ([\text{O}_2]_{\text{arterial}} - [\text{O}_2]_{\text{venoso}})$$

En función de la ecuación 3, y de forma muy simple, la discusión se ha centrado en atribuir al sistema cardiovascular o al músculo la responsabilidad en la limitación al ejercicio máximo, indicándolos como central y periférico, respectivamente. Si bien, desde un punto de vista

didáctico puede ser acertada tal separación, en un sentido fisiológico, no es coherente atribuir a la bomba cardiaca el papel de central y, por otra parte, “separar” la función ventricular de la circulación muscular.

El problema radica en que, incluso aún bien diseñado metodológicamente un estudio experimental, es difícil aislar todas aquellas variables fisiológicas que afectan a la captación, transporte, bombeo-distribución y liberación del oxígeno. La forma de entender la limitación central del VO_2 obedece a la capacidad finita de la función ventricular, que vendría limitada por el valor de Q en la ecuación 1. La limitación de la captación del oxígeno por el tejido muscular, tendría su origen en la capacidad de difusión de este gas que viene determinada por la relación entre la presión parcial de oxígeno a nivel capilar y la presión parcial de oxígeno a nivel mitocondrial. Así, cuando la presión parcial de oxígeno a nivel mitocondrial alcanza un determinado valor se “bloquearía” o “disminuiría” la difusión de este gas desde los capilares. De tal manera que, aún aumentando el flujo local no se podría aprovechar el oxígeno.

Por otra parte, la función respiratoria ha sido sistemáticamente ignorada en la participación central del límite del VO_2 . Aunque desde hace tiempo se ha establecido la hipótesis relativa a la limitación respiratoria del VO_2 ¹³, ha sido recientemente cuando ha cobrado más interés¹³⁻¹⁶.

ADAPTACIÓN DE LOS PARÁMETROS ERGOESPIROMÉTRICOS EN LA POBLACIÓN ENTRENADA

Así como los estudios llevados a cabo para conocer los efectos del entrenamiento han sido muy numerosos en la población sedentaria o moderadamente entrenada, muy pocos autores han estudiado los cambios en deportistas de élite o sub-élite.

El resultado de la búsqueda con la frase señalada en la introducción ha sido: 79 artículos publicados y 53 tesis doctorales. Del total de publicaciones potenciales, se han descartado 46 artículos

y 51 tesis doctorales. Del total de artículos seleccionados para su análisis, únicamente se han tomado en consideración aquéllos (13 trabajos y 2 tesis doctorales) donde había datos ergoespirométricos de potencia aeróbica y transición aeróbica-anaeróbica. En general, la mayor parte de los estudios han abordado la evolución de parámetros ergoespirométricos a lo largo de una temporada^{4,17-27} y menos han sido los estudios llevados a cabo de diversas temporadas²⁸⁻³⁰. Por último señalar que, a pesar de las condiciones de búsqueda, no en todos los estudios analizados la población es de elite. En algunos estudios se trataba de población joven o sub-élite.

Margen de adaptación del VO_2 máximo

En los estudios consultados, el “margen de adaptación” de este parámetro máximo en valores absolutos es muy variable (Tablas 1 y 2). En general, el porcentaje de cambio entre dos, tres o cuatro determinaciones es inferior al 7%^{4,17,19,21,23,26,27}. Es decir, el mayor valor de VO_2 máximo en un momento difiere en un 7 % respecto del correspondiente en otro momento. Algunos autores han observado diferencias superiores al 20 %³⁰. Sin embargo, estos estudios se desarrollaron con atletas de sub-élite y jóvenes, de manera que la edad es un factor determinante en los valores alcanzados. Así pues, cuando mayor es el nivel de adaptación, menor es la diferencia observada a lo largo de una temporada²¹.

Cuando la potencia aeróbica se expresa en valores relativos al peso corporal, las diferencias observadas en los estudios consultados no superan el 9%^{4,17-27}. Sin embargo, Baumgarti, *et al*²⁸ observaron diferencias superiores a lo largo de 8 temporadas de seguimiento de un grupo de biatletas. Estas diferencias alcanzan valores de hasta el 21% en un grupo de biatletas. No obstante, estas diferencias se dan en un grupo de deportistas considerados de subelite, pues en el grupo de elite las diferencias eran de un 6 a un 12%. Así mismo, Jones²⁹ en el seguimiento realizado a un atleta durante 5 años indica unas diferencias de un 10% entre los valores mayor y menor. De la misma manera que para las unidades absolutas, en unidades relativas, Rusko, *et al*³⁰ demostraron diferencias en el VO_2 máximo del 15 % en deportistas jóvenes.

	I	II	III	IV
Berg, K	53,4 ± 4,1	53,9 ± 3,8		
García Zapico, A (ciclistas)	4793 ± 156 69,9 ± 1,4	5129 ± 116 75,9 ± 1,5	5339 ± 165 79,3 ± 1,7	
García Zapico, A (triatletas)	4505 ± 187 65,9 ± 1,9	4532 ± 147 67,2 ± 1,8	4741 ± 209 79 ± 2,1	
Green, HJ	4,30 ± 0,43 56,4	4,43 ± 0,45 57,1 (4)		
Koutedakis, Y	60,9 ± 3,6	57,3 ± 4,3	54,9 ± 3,8	
Martin, D (n = 6)	77,8	81,7		
Martin, D (n = 4)	81,2	77,7		
Pardo, FJ	5,1 ± 0,1 72,6 (0,5)	5,3 ± 0,1 74,4 ± 1,3	5,2 ± 0,1 75,2 ± 1,6	
Svedenhag, J	4,85 ± 0,99 47,9 ± 1	4,92 ± 0,07 47,1 ± 0,7	5 ± 0,08 47,1 ± 0,9	4,88 ± 0,08 46 ± 0,9
Tanaka, K	3,55 ± 0,33 64,6 ± 3,8	3,59 ± 0,31 65,7 ± 3,5	3,76 ± 0,41 67,3 ± 5,2	
Van Ingen, GJ	62,5 ± 3 54 v 3	62 ± 4 52,5 ± 4	63 ± 3 55 ± 3	65 ± 2 55 ± 4
White, JA	68,4 ± 1,59	72,1 ± 1,9		
Yuan, Y	60,6 ± 5,9	65,4 ± 7,4	64,6 ± 6,5	

TABLA 1. Consumo de oxígeno (ml/min ó ml/kg/min) a lo largo de dos temporadas, en 4 momentos diferentes de cada una de éstas. Algunos autores han estudiado los cambios producidos en momentos diferentes de un macrociclo y otros han analizado los cambios en dos temporadas

Autor	Nivel o categoría	Temporada											
Braumgartl, P	elite	1	2	3	4	5	6	7	8				
		I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
		71	78	67	II	77	II	80	II	76	II	77	II
		II	II	II									
Braumgartl, P	subelite	74	71	72									
		I	I	65	I	66	I	65	I	70	I	74	I
		61	II	65	II	71	II	76	II	75	II	72	II
		II											
Jones, AM	<17	72,8	68,5	66	67	66,7							
		3,41± 0,67	4,81± 0,63										
Rusko, H	mujeres	60,4± 5,2	69,8±4,4										
		17-19											
		19-22											
		16-18											

TABLA 2. Consumo de oxígeno (ml/min ó ml/kg/min) a lo largo de una temporada, en diversos momentos de un macrociclo

Es de resaltar que en los estudios consultados las diferencias no eran significativas, tanto a largo

de una temporada como a lo largo de diversas temporadas. No obstante, no deja de ser rese-

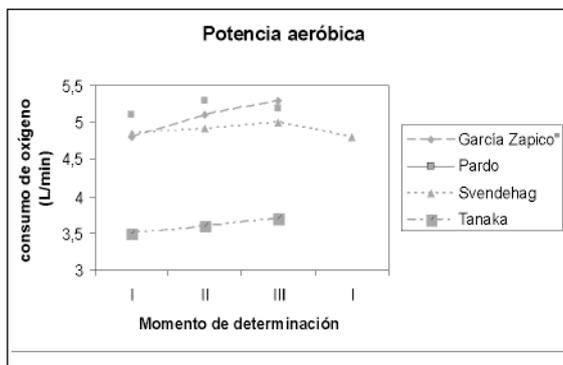


FIGURA 1.

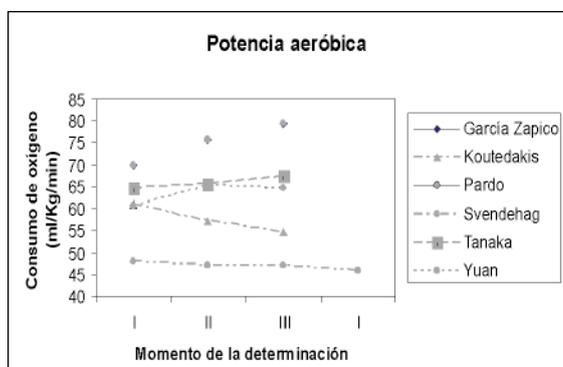


FIGURA 2.

ñable que los valores de VO_2 más elevados se midieron cuando presumiblemente el grado de adaptación era mayor^{4,17-20,23,25,26}.

Por tanto, aunque las diferencias sean muy pequeñas y no muestren significación estadística, los estudios consultados parecen indicar que según avanza la temporada la potencia aeróbica aumenta (Figuras 1 y 2). La cuestión a dilucidar es saber si estas diferencias pueden explicar la mejora del rendimiento, que naturalmente experimenta una persona entrenada a lo largo del proceso del entrenamiento, o por el contrario disponemos de herramientas de medida poco sensibles como para valorar pequeños cambios y que estos sean lo suficientemente significativos. Según los datos presentados en trabajos independientes, podemos decir que los aparatos son sensibles a las variaciones de VO_2 máximo, aunque sea complejo atribuir la mejora del rendimiento a la adaptación de esta variable ergoespirométrica.

Margen de adaptación de la transición aeróbica-anaeróbica

Los valores correspondientes a la situación de cambio metabólico han recibido numerosos términos acuñados por cada uno de los investigadores que han estudiado la transición aeróbica-anaeróbica^{1,29,31-37}. La confusión terminológica del fenómeno de transición aeróbica-anaeróbica determina la dificultad de análisis. En el presente trabajo hemos optado por los siguientes términos: umbral ventilatorio 1, umbral ventilatorio 2 y umbral láctico. Estos parámetros se muestran en las Tablas 3 y 4.

No en todos los estudios se han valorado los mismos parámetros. Mientras algunos estudios han valorado el umbral láctico^{4,17,21}, otros han valorado los umbrales ventilatorios, umbral anaeróbico, umbral láctico o todos estos^{4,17,19-23,27,37,38}.

En los estudios realizados durante una temporada^{17,21,27}, el VT_1 oscilaba entre 0,5% y el 22%, expresado este parámetro en relación al VO_2 máximo. De los estudios llevados a cabo durante diversas temporadas²⁸⁻³⁰, no midieron los umbrales ventilatorios. El grado de modificación del umbral ventilatorio se relaciona estrechamente con el nivel de adaptación al entrenamiento. Así, en ciclistas profesionales²¹ el porcentaje de aumento entre diferentes periodos medidos era inferior al 2%, mientras en ciclistas de menor nivel¹⁷ el rango fue del 3 al 15%.

El rango de variación del umbral ventilatorio 2 o del umbral anaeróbico es del 2,5 al 12,8%. El umbral láctico en los estudios consultados^{4,17,19-23,27} experimenta una variación del 0% al 36,8%. Este rango tan amplio se debe a problemas metodológicos, tales como la población estudiada y el método de determinación. Contrariamente al umbral ventilatorio 1, el grado de adaptación no parece ser tan importante. Mientras en el estudio con ciclistas profesionales²¹ las diferencias son del 1,5 al 2,8%, en ciclistas de subelite¹⁷, son del 0 al 3,6%. En el estudio de Baumgartl, las diferencias observadas a lo largo de las 8 temporadas son notables. En los dos momentos donde se midieron por cada temporada las diferencias fueron del 0% al 15,5%, para los atletas de elite y

	I	II	III	IV
Berg, K	8,1 ± 0,4	8,2 ± 0,3	11 ± 1	
García Zapico, A (ciclistas)	11,3 ± 1,1 52 ± 2,1 82,5 ± 1,7	12 ± 1,1 60 ± 1,8 87,9 ± 1	62 ± 1,7 90,1 ± 1,4	
García Zapico (triatletas)	12,1 ± 1,4 50 ± 2,5 83,2 ± 2	10,3 ± 1,4 61 ± 2,1 83,2 ± 1,2	14,1 ± 1,3 56 ± 2 86,2 ± 1,6	
Koutedakis, Y	85,4 ± 5,2	82,2 ± 5,2	76,9 ± 4,2	
Martin, D (n = 6)	88,2 ± 10,3	↑ 5,6 %		
Martin, D (n = 4)	178 ± 9,5			
Pardo, FJ	7,9 ± 0,5 71,6 ± 1,3 88,7 ± 0,8	8,1 ± 0,5 72 ± 1,5 86,7 ± 1,1	6,7 ± 0,5 73,1 ± 1,3 89,2 ± 1,1	
Svedenhag, J	85,9 ± 1,3	85,6 ± 1,3	82,8 ± 1,1	85,2 ± 1,2
Tanaka, K	75,1 ± 5,5	74,5 ± 5,2	74,5 ± 3,5	
White, JA	281 ± 29,9 518 ± 37,5	317 ± 29,1 557 ± 38,5		
Yuan, Y	62,2 ± 5,6 76 ± 5,9	56,9 ± 7,2 76 ± 4,8	63,5 ± 4,7 78,6 ± 6,4	

TABLA 3. Parámetros de la transición aeróbica-anaeróbica (umbrales ventilatorios o umbral láctico) a lo largo de dos temporadas, en 4 momentos diferentes de cada una de éstas. Algunos autores han estudiado los cambios producidos en momentos diferentes de un macrociclo y otros han analizado los cambios en dos temporadas

Autor	Nivel o categoría	Temporada													
Braumgartl, P	elite	1	2	3	4	5	6	7	8						
		I	I	67	I	53	I	58	I	74	I	I			
		61	II	58	II	60	58	II	62	II	76	69			
		II			II					II	II				
Braumgartl, P	subelite	61			61				77	73					
		I	I	53	I	55	I	60	I	59	I	70	I	72	
		65	II	54	II	53	60	II	56	II		II	76	II	73
		II			II				60						
Jones, AM		50			52										
		15	16,6	17	18	18									
Rusko, H	<17	70,7±	74,6±												
		8,5													
		72,6±	77,7±4,2												
		4,2													
		17-19	73,8±	78,1±3,8											
		19-22	4,4												
mujeres		16-18	78,1±	77,1±6,2											
		3,8													

TABLA 4. Parámetros de la transición aeróbica-anaeróbica a lo largo de una temporada, en diversos momentos de un macrociclo

del 1,3% al 30 % para los atletas de subelite. Sin embargo, Rusko, *et al*³⁰ encontraron pequeñas di-

ferencias (0-5,8%) en los dos años que realizaron el estudio en esquiadores de fondo.

En resumen, la transición aeróbica-anaeróbica experimenta una oscilación considerable para el umbral ventilatorio 1 y un menor porcentaje de adaptación para el umbral ventilatorio 2 y el umbral láctico. En la mayor parte de los estudios las diferencias no eran significativas, de manera que, igual que para la potencia aeróbica, se puede enunciar el mismo planteamiento.

Resumen de la evolución de los parámetros ergoespirométricos: explicación fisiológica

El hecho de que la potencia aeróbica experimente una variación tan pequeña (Figuras 1 y 2) durante una temporada se puede explicar de dos formas. En primer lugar, los parámetros que determinan el consumo de oxígeno (ecuación 1) no cambian sustancialmente a consecuencia del entrenamiento, principalmente en personas con un elevado grado de adaptación. Al no disponer de datos relativos a estos dos parámetros se desconoce cual puede ser la influencia en el aumento del consumo de oxígeno máximo. En segundo lugar, en la mayor parte de los estudios consultados los valores más elevados de potencia aeróbica se encuentran cuando los deportistas están “más entrenados”.

Por otra parte, las mayores diferencias observadas en la transición aeróbica anaeróbica (Figura 3), son debidas a la terminología y procedimiento de determinación. Teniendo en cuenta que la metodología empleada en la determinación de los umbrales ventilatorios está relacionada directamente con el sistema visual, se comprenderá la

facilidad con la que se pueden cometer errores. De hecho, las diferencias encontradas en los parámetros que valoran la transición aeróbica-anaeróbica son mayores que las correspondientes al consumo máximo de oxígeno.

PRECISIÓN DE LOS APARATOS DE ERGOESPIROMETRÍA

Desde los orígenes de los procedimientos de calorimetría indirecta³⁹, los instrumentos de medida han cambiado muy poco. Se ha mejorado notablemente en la facilidad de manejo de los aparatos y en la obtención de la gran cantidad de datos, debido al desarrollo de aplicaciones informáticas. No obstante, y de forma paradójica, la mayor manejabilidad de los aparatos ha resultado contraproducente. ¿Por qué razón o razones algunos grupos de investigación siguen utilizando sistemas de análisis del gas espirado de hace más de 100 años? La fiabilidad de los aparatos de ergoespirometría radica principalmente en la linealidad en un cualquier rango de medida. Este epígrafe se desarrolla en dos apartados: 1º teórico y 2º práctico.

Procedimientos de análisis cuantitativo y cualitativo del gas espirado.

Sin ánimo de ser exhaustivos, y remitiendo al lector interesado a excelentes trabajos publicados en monografías³⁹, a continuación presentamos los procedimientos de medición de la ventilación y composición del gas espirado.

Medición de la ventilación

Tres tipos de aparatos miden el volumen de aire en la unidad de tiempo, ya sea durante la espiración o la inspiración: espirómetros de campana, neumotacógrafos y turbinas. La medición del volumen total de gas espirado se puede realizar recogiendo en los conocidos sacos de Douglas y posteriormente midiendo el volumen contenido con gasómetros (húmedos y secos). Sin embargo, los sistemas actuales utilizan el neumotacógrafo o variantes del mismo y la turbina.

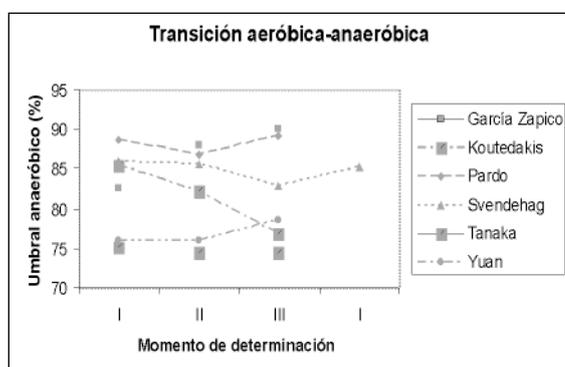


FIGURA 3.

Medición de la composición del aire

Los procedimientos para medir la composición del gas espirado obedecen a dos tipos de principios. Por un lado, se “utilizan” las características químicas de los dos gases medidos (oxígeno y dióxido de carbono) al reaccionar con compuestos químicos específicos para cada uno de ellos. Por otra parte, las características físicas de las dos moléculas permiten su medición. El desarrollo tecnológico y la “automatización” de la ergoespirometría han determinado que en los últimos 50 años la totalidad de los aparatos comerciales utilicen procedimientos físicos o químico-físicos. Sin embargo, eso no implica que haya que desechar los métodos químicos, entre otros motivos por su gran exactitud. La elección del método depende de las siguientes condiciones: precisión en la medición, velocidad de respuesta y coste económico. En este apartado se indican de forma puntual los dos tipos de procedimientos.

Procedimientos químicos. Se basan en las variaciones de volumen a presión constante de diferentes soluciones cuando reaccionan con el oxígeno o el dióxido de carbono. El aire se recoge en los sacos de Douglas, midiendo el volumen con un gasómetro. Del volumen total, se extrae una pequeña cantidad que se analiza principalmente mediante dos aparatos: 1) aparato de Haldane y 2) aparato de Scholander. El principio consiste en la reacción de cualquiera de los dos gases con soluciones específicas, provocando variaciones de volumen. La precisión de los dos aparatos es muy alta.

Procedimientos físicos. El oxígeno presenta una característica física importante, el paramagnetismo, que consiste en la propiedad de algunas moléculas o átomos de desviar un campo magnético en virtud de la disposición de los orbitales en el espacio. Por otra parte, el dióxido de carbono presenta la característica de absorber los rayos infrarrojos. Otros aparatos que utilizan las características físicas de los gases son el espectrómetro de masas y la cromatografía de gases.

Obtención de datos: casos prácticos

Los aparatos de ergoespirometría, en realidad, se limitan a medir únicamente cuatro variables¹²:

ventilación en espiración (V_E) o inspiración (V_I), fracción de oxígeno en el aire espirado ($F_{E O_2}$), fracción de dióxido de carbono en el aire espirado ($F_{E CO_2}$) y frecuencia respiratoria (B_F). A partir de estos cuatro parámetros, más la frecuencia cardíaca registrada mediante electrocardiógrafo o pulsómetro, los aplicaciones informáticas dan una gran diversidad de datos, resultado de operaciones aritméticas elementales. Los parámetros centrales de la información que se utilizan en ergoespirometría son el consumo de oxígeno (VO_2) y la eliminación de dióxido de carbono (VCO_2). Desgraciadamente, las casas comerciales no aportan información a los procedimientos de cálculo de estas dos variables.

Al objeto de ser prácticos, a continuación omitiremos toda descripción pormenorizada de las ecuaciones que permiten determinar los dos parámetros y nos limitaremos a dar dos casos prácticos de posibles fuentes de error. Pueden producirse dos errores: 1º) el sistema que mide V_E o V_I pierde o no guarda linealidad, mientras los analizadores miden correctamente y 2º) el sistema que mide la composición del gas espirado no mide correctamente, pero si lo hace el sistema de medición de V_E o V_I .

Primera fuente error: no linealidad del espirómetro y normalidad de los analizadores. Supongamos que nuestro sistema mide 110 L/min y posteriormente se comprueba que hay un error del + 5 %. La $F_{E O_2}$ es del 16,9%. Veamos el valor de VO_2 , asumiendo que V_E es igual a V_I . Sustituyendo en la ecuación 1, tenemos:

$$VO_2 \text{ medido} = 110 (0,209 - 0,169) = 4,4 \text{ L/min}$$

$$VO_2 \text{ real} = 115,5 (0,209 - 0,169) = 4,6 \text{ L/min}$$

Es decir, con un error del 5% encontramos una desviación del VO_2 del 4,3%. ¿Qué sucedería si el aparato nos hubiera fallado cuando estamos evaluando el proceso de adaptación de atletas de resistencia? En este ejemplo, vemos como se ha producido una pérdida de linealidad (Figura 4), que aún siendo baja puede ser muy importante cuando se pretende demostrar cambios en personas muy entrenadas.

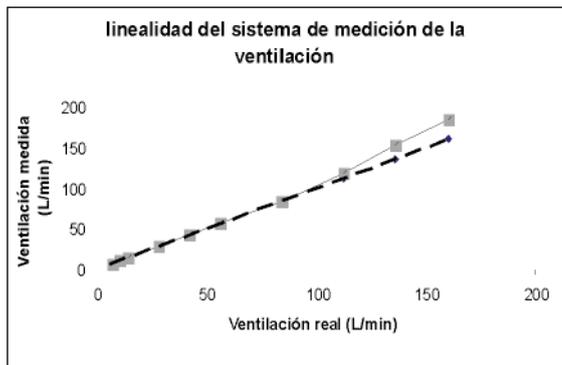


FIGURA 4.

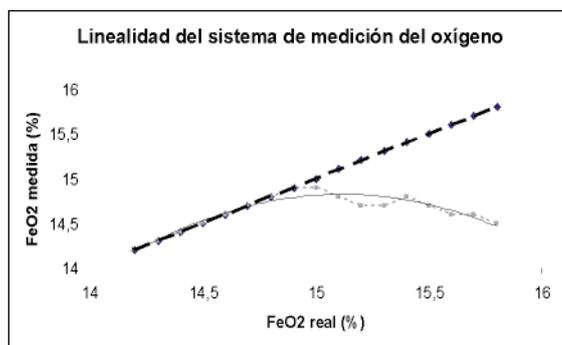


FIGURA 5.

Segunda fuente de error: no linealidad de los analizadores y normalidad del espirómetro. Supongamos que el analizador de oxígeno mide una $F_{E}O_2 = 17,9$ y posteriormente se comprueba que la $F_{E}O_2$ es 17,8. El valor correspondiente de V_E es de 115 L/min. Aplicando de nuevo la ecuación 1 tenemos:

$$VO_2 \text{ medido} = 115,5 (0,209 - 0,179) = 3,46 \text{ L/min}$$

$$VO_2 \text{ real} = 115,5 (0,209 - 0,178) = 3,58 \text{ L/min}$$

Teniendo en cuenta las diferencias del VO_2 máximo para los deportistas entrenados (véase epígrafe 3) habríamos cometido un error del 3 % con una pérdida de linealidad del analizador del oxígeno del 0,56%. De nuevo, comprobamos los informes de calibración y vemos que, en efecto, son correctos. Podríamos asumir el error considerando que se ha utilizado el mismo aparato en los dos momentos de la determinación. Pero, ¿y si el aparato se ha desajustado a la mitad del es-

tudio de investigación? La Figura 5 ilustra la pérdida de linealidad de un analizador de oxígeno

En resumen, la calibración y control periódico de los equipos de ergoespirometría debería ser seguido de forma escrupulosa, sobre todo cuando el objetivo es la valoración en deportistas muy entrenados. En un estudio realizado para comprobar la precisión de los análisis de gases en los laboratorios de función pulmonar⁴⁰ el porcentaje de exactitud fue del 48% para el oxígeno y del 28% para el dióxido de carbono. El coeficiente de variación para el dióxido de carbono fue del 9%. Cinco analizadores presentaban errores a la hora de realizar el cero y no se disponía de información suficiente para conocer la fuente de errores.

RESUMEN

El objetivo de esta revisión es analizar la evolución de los parámetros más representativos de una prueba de esfuerzo a medio o largo plazo. Hemos realizado una búsqueda restringida en la base de datos medline y en la base de datos sobre tesis doctorales publicadas en España. Los parámetros ergoespirométricos analizados en los estudios consultados han sido el consumo máximo de oxígeno y la transición aeróbica-anaeróbica

Las diferencias de VO_2 máximo absoluto (l/min) han sido del 7% cuando se comparan resultados en diferentes momentos de una temporada e inferiores al 9% en unidades relativas (ml/Kg/min). La mayor parte de los estudios no han demostrado significación estadística, si bien en la mayor parte, los valores más altos correspondían al momento de mejor estado de entrenamiento. La transición aeróbica-anaeróbica experimenta una oscilación considerable entre diferentes estados de entrenamiento. El umbral ventilatorio 1 (VT_1) estaba comprendido entre 0,5% y el 22% y el umbral ventilatorio 2 (VT_2) entre el 2,5 al 12,8%. El umbral láctico en los estudios consultados experimenta una variación del 0% al 36,8%.

¿Pueden explicar las diferencias encontradas la mejora del rendimiento deportivo a lo largo del proceso de entrenamiento? De no ser así, significaría que los procedimientos de análisis del volumen y composición del gas espirado son poco sensibles para determinar pequeñas variaciones que nos explique el mejor rendimiento. Por tanto, es de capital trascendencia ser extremadamente rigurosos en la calibración y control de la linealidad de los aparatos de ergoespirometría.

Palabras clave: Consumo de oxígeno. Umbral anaeróbico. Estudios longitudinales. Élite.

SUMMARY

The objective of this review is to analyze the evolution of the most representative ergospirometrics parameters in long term studies. We have carried out a search restricted in the medline database and in the doctoral thesis database published in Spain. The ergospirometrics parameters analyzed in advised studies have been the maximal oxygen uptake (VO_2 max) and the aerobic-anaerobic transition.

The differences of VO_2 max (l/min) have been of 7% when results are compared in different moments of a season and inferior to 9% in relative units (ml/Kg/min). In most of the studies statistical significance has not been demonstrated, although in most the highest values corresponded to the moment of better training state. The ventilatory threshold 1 (VT_1) oscillated between 0,5% and 22% in the different training states and the ventilatory threshold 2 (VT_2) from 2,5 to 12,8%. The lactic threshold in the consulted studies experiences a variation from 0% to 36,8%.

Can be explain the differences of the improvement of sport performance along the training process? Of not being this way, would mean that the procedures of volume and composition analysis of the expired gas are not very sensitive to determine small variations that explains to us the best performance. Therefore, it is of capital transcendancy to be extremely rigorous in the calibration and control of lineality of the ergospirometrics devices.

Key words: oxygen uptake. Anaerobic threshold. Longitudinal studies. Elite.

B I B L I O G R A F Í A

1. Wasserman K, Hansen JE, Sue D, Y, Whipp BJ, Casaburi R. Principles of exercise testing and interpretation. Philadelphia: Lea & Febiger, 1994; 1-8.
2. McArdle WD, Katch FI, Katch VL. **Fundamentos de fisiología del ejercicio**. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2004;199-204.
3. Wilmore JH, Costill DL. Fisiología del esfuerzo y del deporte. Barcelona: Paidotribo, 2004; 294-403.
4. Berg K. Endurance training and performance in runners: research limitations and unanswered questions. *Sports Med* 2003;1:59-73.
5. Mujika I, Padilla S. Detraining: loss of training-induced physiological and performance adaptations. Part I: short term insufficient training stimulus. *Sports Med* 2000;2:79-87.
6. James DV, Doust JH. Oxygen uptake during high-intensity running: response following a single bout of interval training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1999;3:237-43.
7. Xu F, Rhodes EC. Oxygen uptake kinetics during exercise. *Sports Med* 1999;5:313-27.
8. Sutton JR. Limitations to maximal oxygen uptake. *Sports Med* 1992;2:127-33.

9. Sutton JR. VO₂max--new concepts on an old theme. *Med Sci Sports Exerc* 1992;1:26-9.
10. Vandewalle H. [Oxygen uptake and maximal oxygen uptake: interests and limits of their measurements]. *Ann Readapt Med Phys* 2004;6:243-57.
11. Calderón FJ, García A, Benito PJ, Legido JC. Adaptación biológica al entrenamiento de resistencia. *Archivos de Medicina del Deporte* 2004; 4:317-24.
12. Calderon FJ, Benito PJ. Ergoespiometría: paradigma del análisis de la respuesta integrada al ejercicio dinámico. Selección. 2001;1:21-36.
13. West JB. Diffusion at high altitude. *Fed Proc* 1982;6:2128-30.
14. Dempsey JA, Wagner PD. Exercise-induced arterial hypoxemia. *J Appl Physiol* 1999;6:1997-2006.
15. Nielsen HB. Arterial desaturation during exercise in man: implication for O₂ uptake and work capacity. *Scand J Med Sci Sport* 2003;6:339-58.
16. Walls J, Maskrey M, Wood-Baker R, Stedman W. Exercise-induced oxyhaemoglobin desaturation, ventilatory limitation and lung diffusing capacity in women during and after exercise. *Eur J Appl Physiol* 2002;2:145-52.
17. García Zapico A. Evolución comparada de los parámetros fisiológicos en triatletas y ciclistas de élite, a lo largo de una temporada Madrid. Universidad Politécnica de Madrid, 2004.
18. Green HJ, Houston ME. Effect of a season of ice hockey on energy capacities and associated functions. *Med Sci Sports* 1975;4:299-303.
19. Koutedakis Y. Seasonal variation in fitness parameters in competitive athletes. *Sports Med* 1995;6:373-92.
20. Martin D, Vroon D, May D, Pibeam S. Physiological changes in elite male distance runners training. *The Physician and sportmedicine* 1986; 1:152-66.
21. Pardo Gil FJ. Evolución de los parámetros fisiológicos en ciclistas profesionales a lo largo de una temporada Madrid. Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
22. Svedenhag J, Sjodin B. Physiological characteristics of elite male runners in and off-season. *Can J Appl Sport Sci* 1985;3:127-33.
23. Tanaka K, Matsuura Y, Matsuzaka A, Hirakoba K, Kumagai S, Sun SO, et al. A longitudinal assessment of anaerobic threshold and distance-running performance. *Med Sci Sports Exerc* 1984;3:278-82.
24. Tanaka K, Watanabe H, Konishi Y, Mitsuzono R, Sumida S, Tanaka S, et al. Longitudinal associations between anaerobic threshold and distance running performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1986;3:248-52.
25. van Ingen Schenau GJ, Bakker FC, de Groot G, de Koning JJ. Supramaximal cycle tests do not detect seasonal progression in performance in groups of elite speed skaters. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1992;4:292-7.
26. White JA, Quinn G, Al-Dawalibi M, Mulhall J. Seasonal changes in cyclists' performance. Part I. The British Olympic road race squad. *Br J Sports Med* 1982;1:4-12.
27. Yuan Y, Chan KM. A longitudinal study on the ammonia threshold in junior cyclists. *Br J Sports Med* 2004;2:115-9.
28. Baumgartl P. Treadmill ergometry and heart-volumes in elite biathletes: a longitudinal study. *Int J Sports Med* 1990;3:223-7.
29. Jones AM. A five year physiological case study of an Olympic runner. *Br J Sports Med* 1998; 1:39-43.
30. Rusko H. The effect of training on aerobic power characteristics of young cross-country skiers. *J Sports Sci* 1987;3:273-86.
31. Brooks GA. Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Med Sci Sports Exerc* 1985;1:22-34.
32. Davis JA. Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Med Sci Sports Exerc* 1985;1:6-21.
33. di Prampero PE. The anaerobic threshold concept: a critical evaluation. *Adv Cardiol* 1986:24-34.
34. Floria VG, Mareev V. [Anaerobic threshold: definition, physiology and methods of determination]. *Kardiologiia* 1993;5:40-6.
35. Hollmann W. Historical remarks on the development of the aerobic-anaerobic threshold up to 1966. *Int J Sports Med* 1985;3:109-16.

36. **Walsh ML, Banister EW.** Possible mechanisms of the anaerobic threshold. A review. *Sports Med* 1988;5:269-302.
37. **Blanco Herrera J, De Brito Vidal Filho JC.** Respuestas fisiológicas durante el juego de baloncesto en preadolescentes y adolescentes. *Archivos de Medicina del Deporte* 2003:305.
38. **Rodríguez Marroyo JA, García López J, Vaquera Jiménez A.** Consumo máximo de oxígeno en baloncesto: Influencia del sexo y del puesto específico. *Archivos de Medicina del Deporte* 2003:205-12.
39. **McLean JA, Tobin G.** *Animal and human calorimetry* Cambridge: Cambridge University Press, 1987:238-73.
40. **Chinn DJ, Naruse Y, Cotes JE.** Accuracy of gas analysis in lung function laboratories. *Thorax* 1986;2:133-7.