



Aspectos Fundamentales del Umbral Anaeróbico

José V. Subiela D.¹.

¹Universidad Pedagógica Experimental Libertador Instituto Pedagógico de Barquisimeto, UPEL-IPB jsubiela@cantv.net

Correspondencia: Instituto de Medicina Tropical - Facultad de Medicina - Universidad Central de Venezuela.

Consignado el 05 de Mayo del 2007 a la Revista Vitae Academia Biomédica Digital.

RESUMEN

El concepto de umbral anaeróbico fue propuesto por Wasserman (1,2) a principios de la década de 1960, para expresar la pérdida de la relación lineal entre la ventilación pulmonar y la carga de trabajo y/o consumo de oxígeno, un hecho que coincide con la acumulación de ácido láctico en sangre y la aparición de una acidosis metabólica. Con el paso de los años, diversos autores (3,4,5,6,7,12) han hecho aportes que enriquecen significativamente este concepto y contribuyen a ampliar su campo de aplicación, tanto en atletas, como en personas sanas no deportistas e igualmente en pacientes con EPOC y cardiopatía isquémica. En la actualidad, la determinación del umbral anaeróbico se incluye de manera regular, tanto en la evaluación de la aptitud física de los atletas y la población sana en general, como en las pruebas de esfuerzo practicadas a pacientes pulmonares y cardíacos, lo cual permite una prescripción individualizada y más precisa de los programas de entrenamiento y de rehabilitación.

PALABRAS CLAVE: umbral anaeróbico, umbral ventilatorio, umbral láctico

SUMMARY

The concept of anaerobic threshold was proposed by Wasserman (1,2) in 1964, in order to express the loss of linear relationship between pulmonary ventilation and the workload and/or the oxygen consumption, a fact that coincides with lactic acid accumulation in blood and the onset of metabolic acidosis. For years, different authors (3,4, 5,6,7,12) have enriched significantly such concept and expand it into a field of application in athletes, as well as in nonsport healthy people and patients, specifically those suffering from Chronic Obstructive Pulmonary Disease (COPD)

and ischemic cardiopathy. Nowadays, anaerobic threshold determination should be included in a regular routine of physical evaluation of athletes and healthy population, as well as in stress tests in pulmonary and cardiac patients in order to plan successful individual training or rehabilitation programs.

KEY WORDS: : anaerobic threshold, ventilatory threshold, lactate threshold, heart rate

INTRODUCCIÓN

El concepto de umbral anaeróbico fue introducido por Wasserman y McIlroy en 1964 (1), quienes lo definieron como "la intensidad de ejercicio en la que comienza a incrementarse la concentración sanguínea de ácido láctico, y a disminuir la de bicarbonato". Posteriormente se definió como "la intensidad de ejercicio o de trabajo físico por encima de la cuál comienza a aumentar de forma progresiva la concentración de ácido láctico en sangre, al mismo tiempo que la ventilación se incrementa de una manera desproporcionada con respecto al consumo de oxígeno" (2), (figura 1.)

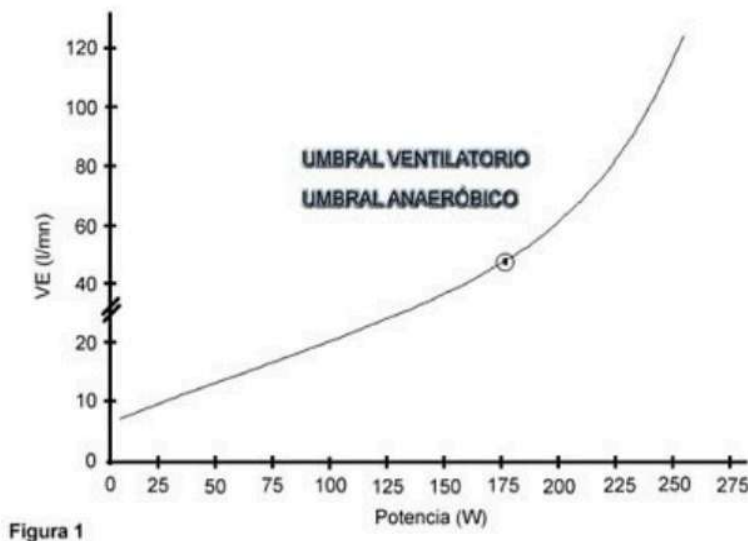


Figura 1. Determinación del umbral anaeróbico mediante la relación VE/W según el concepto clásico de Wasserman. Nótese la ruptura de la relación lineal al 64% de la capacidad máxima de trabajo.

Estos cambios conllevan la disminución del pH y el aumento del cociente respiratorio.

Este es un concepto muy importante que ha permitido una mayor comprensión de las respuestas fisiológicas al ejercicio de larga duración. Hoy en día el umbral anaeróbico es considerado uno de los indicadores objetivos más confiable en relación a la capacidad de ejercitación y de rendimiento en actividades prolongadas.

EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE UMBRAL ANAERÓBICO

En la respuesta orgánica al ejercicio físico están comprometidos toda una serie de funciones cardiovasculares, respiratorias y metabólicas que establecen los márgenes de intensidad que el sujeto puede tolerar manteniendo unas condiciones fisiológicas estables. Una vez rebasado este dintel, los cambios comienzan a acumularse de manera progresiva hasta que sobreviene la fatiga, y con ella la incapacidad para mantener la intensidad del ejercicio.

El interés en determinar el "punto máximo" de intensidad en el que cada sujeto puede mantenerse activo por períodos prolongados o muy prolongados sin comprometer la estabilidad de las variables orgánicas fundamentales, a objeto de propiciar efectos de entrenamiento óptimos, ha sido uno de los objetivos fundamentales de la fisiología del ejercicio. En el afán de encontrar indicadores objetivos en el que se pudieran conjugar tales premisas, varios autores hicieron contribuciones interesantes. Mader et al. (3) y Heck et al. (4) propusieron que la intensidad de trabajo en la que se alcanza una concentración de lactato de 4mmol/l, determinado en sangre capilar, se considere el límite aeróbico-anaeróbico, (figuras 2 y 3).

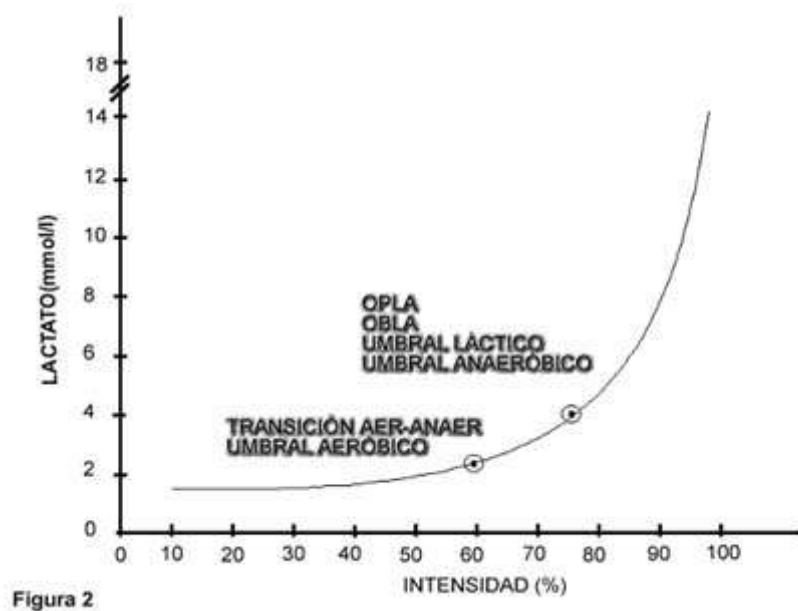


Figura 2. Umbral aeróbico al nivel de 2mmol/l de lactato y umbral anaeróbico o umbral láctico (UL) a 4mmol/l.

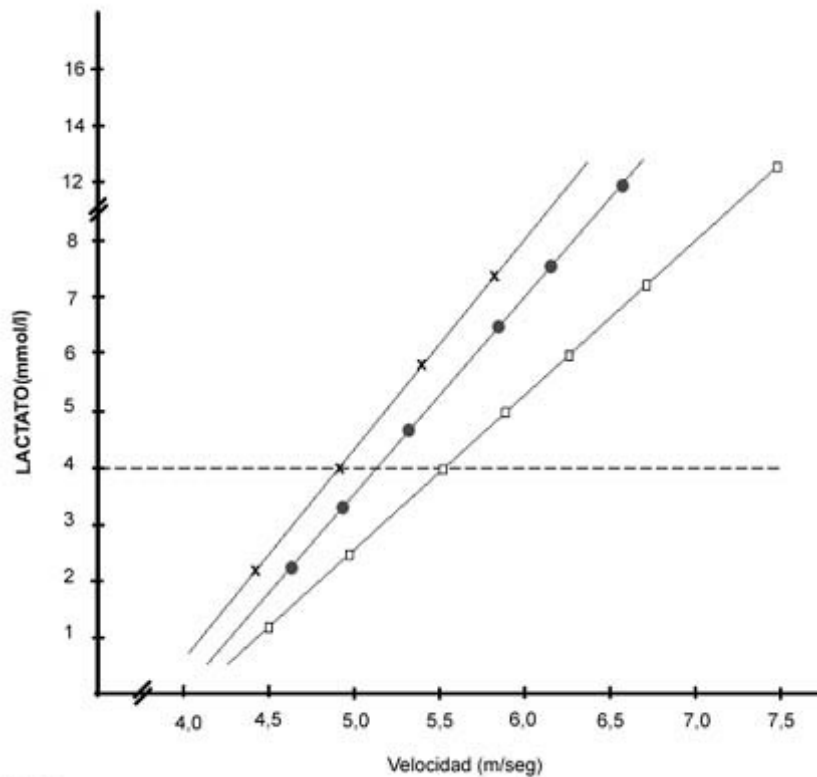


Figura 3

Figura 3. Determinación del umbral láctico en pruebas de campo seriadas tomando muestras de sangre capilar, según el método propuesto por Mader et al (3, 4)

En la práctica se acepta que dichos niveles de lactato se mantienen estables en el tiempo, con tal se mantenga la intensidad de trabajo en la que se logró dicha concentración. Debe entenderse que éste es un valor de referencia, y en modo alguno un parámetro rígido e inmodificable. Representa el promedio de la concentración lactato en que la mayor parte de los sujetos sanos y físicamente activos, pueden mantenerse ejercitándose o compitiendo por períodos prolongados, en condiciones fisiológicas estables. No hay que olvidar que la intensidad en la que se alcanza el umbral de 4mmol/l, tiene un carácter individual. Para los autores mencionados, la cantidad de lactato producido en un determinado porcentaje de la capacidad máxima de trabajo, es una medida indirecta para el rendimiento máximo del metabolismo aeróbico (cuanto menor la cantidad de lactato producido y mayor el nivel de intensidad alcanzado, mayor la capacidad aeróbica). En esta misma orientación, Farrel et al, 1979 (5), establecieron el comienzo de la acumulación de lactato en plasma en un nivel de 2 y 4mmol/l (OPLA) y Sjodin y Jacobs (6), el comienzo en la acumulación de lactato en sangre en 4mM/l (OBLA), como los valores de referencia para establecer el umbral anaeróbico o umbral de lactato (UL), (figura 4)

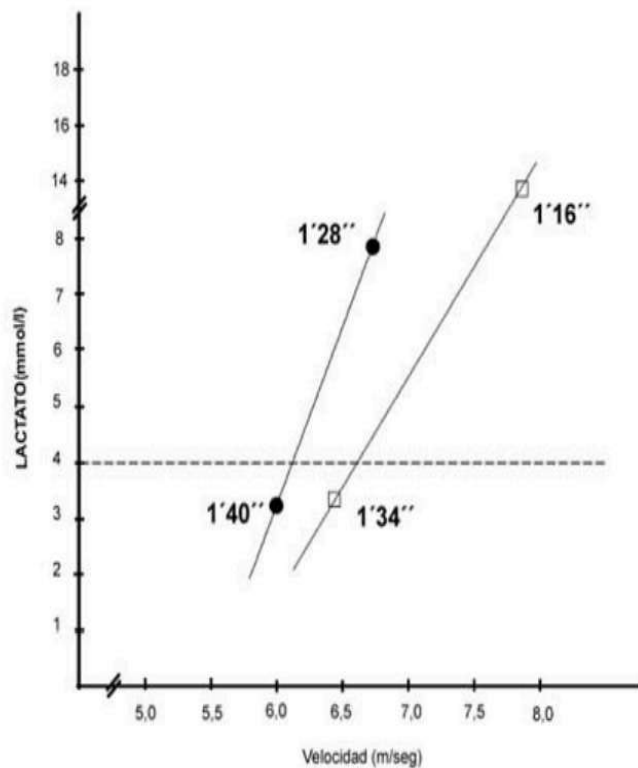


Figura 4

Activ

Figura 4. Intersección en el nivel de 4mmol/l en dos mediciones de campo en la prueba de 600m planos (tiempo empleado en recorrer dicha distancia), una por debajo y otra por encima del (UL), en dos sujetos de condiciones físicas diferentes.

Es decir, aquella intensidad a partir del cuál, todo incremento de la misma provoca un aumento progresivo y sostenido de los niveles de AL.

En el ámbito no invasivo tiene gran interés las propuestas de Orr et al. (7) para establecer dos niveles de ejecución basados en parámetros derivados del intercambio respiratorio, a los que denominaron umbral ventilatorio 1 (VT1), que correspondería a la intensidad de ejercicio en la que el lactato comienza a elevarse por encima de los niveles de reposo, pero que no rebasa los 2 mmol/l, y un segundo nivel que denominan umbral ventilatorio 2 (VT2), (figuras 5 y 6), que corresponde a la máxima intensidad en la que la concentración de lactato, puede permanecer estable alrededor de 4mmol/l, mientras se mantenga constante la intensidad.

VT 1

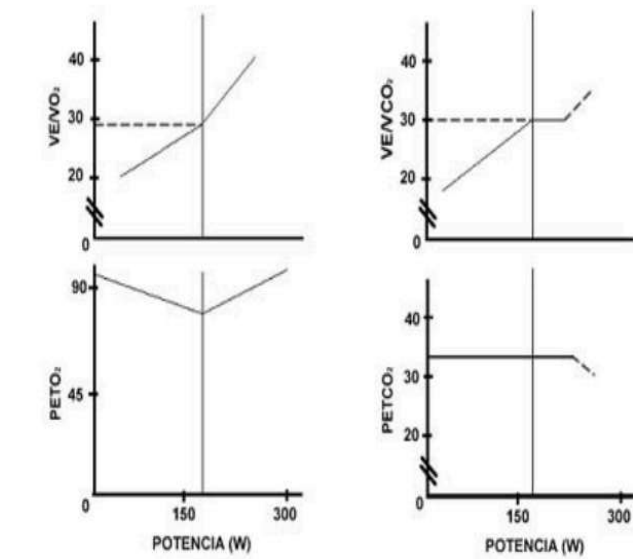


FIGURA 5

Figura 5. Umbral ventilatorio aeróbico (VT1). Obsérvese el aumento del equivalente ventilatorio del oxígeno (VE/VO_2) y la presión de oxígeno al final de la espiración ($PETO_2$), con niveles estables del equivalente ventilatorio del bióxido de carbono (VE/VCO_2) y la presión de bióxido de carbono al final de espiración ($PETCO_2$).

VT 2

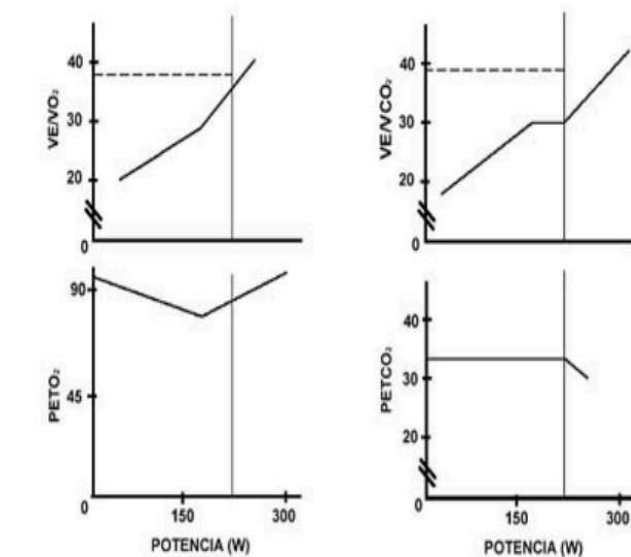


FIGURA 6

Figura 6. Umbral ventilatorio anaeróbico (VT2). Tanto el VE/VO_2 como el VE/VCO_2 aumentan en dicho punto, pero mientras la $PETO_2$ sigue aumentando, la $PETCO_2$ tiende a disminuir.

Los parámetros ventilatorios que permiten establecer el VT1 de forma más objetiva son: el equivalente ventilatorio para el oxígeno (VE/VO_2) y la presión de oxígeno al final de espiración (PETO_2). Estos valores muestran una respuesta bastante predecible durante el ejercicio progresivo, disminuyen discretamente en las primeras cargas, y aumentan a partir de un determinado momento, que corresponde al VT1 y coincide con el comienzo de la concentración de lactato por encima de los valores de reposo. Sin embargo, no solo el ejercicio puede modificar el VE/VO_2 y la PETO_2 , sino otros factores como la ansiedad provocada por el anticipo al ejercicio, la hiperventilación voluntaria y la disminución de la presión de oxígeno en sangre arterial (PaO_2), y ello pudiera interferir en la interpretación correcta de tales modificaciones. En tal sentido hay que considerar un concepto muy importante al respecto, el "tamponamiento isocánico" (8), el cual considera que en el VT1 aumenta el VE/VO_2 y la PETO_2 , sin cambios durante uno más incrementos de la carga, del equivalente ventilatorio del CO_2 (VE/VCO_2) y la presión de bióxido de carbono al final de la espiración (PETCO_2), debido a que el sistema buffer bicarbonato/ácido carbónico, tiene la capacidad de amortiguar el lactato producido, manteniéndose constante la PaO_2 y el pH (9), durante esa transición. Esta fase corresponde a un nivel de lactato de 2 mmol/l aproximadamente (10, 11). Cuando aumenta la intensidad del ejercicio se va comprometiendo la capacidad de amortiguación del lactato, porque se produce a una tasa mayor que la puede bloquear el sistema "buffer". Esto se evidencia desde el punto de vista respiratorio con un aumento del VE/VCO_2 y de la presión de CO_2 al final de la espiración (PETCO_2), con disminución de la presión arterial de CO_2 (PaCO_2), el pH y aumento del cociente respiratorio (R), a veces por encima de 1.0, y otros cambios análogos en el mecanismo de intercambio gaseoso, correspondiendo al umbral ventilatorio 2 (VT2), (7), que los estudios de correlación lo asocian con una concentración de lactato de 4mmol/l.

En un intento por establecer el CO_2 producido durante la fase de amortiguación química, se desarrolló una técnica consistente en determinar la relación entre el VE/CO_2 y el VE/O_2 a nivel alveolar, respiración por respiración, denominada V-Slope (12), considerando que el VO_2 es un valor que expresa básicamente la intensidad del metabolismo aeróbico y que en las etapas previas al umbral ventilatorio (VT2) se relaciona linealmente con el VCO_2 , pero cuando éste lo rebasa debido al CO_2 añadido a causa de la amortiguación del lactato por el bicarbonato, la pendiente del VE/VCO_2 aumenta. El punto de modificación de la pendiente, (figura 7), se conoce como V-Slope, y suele coincidir con el umbral anaeróbico individual.

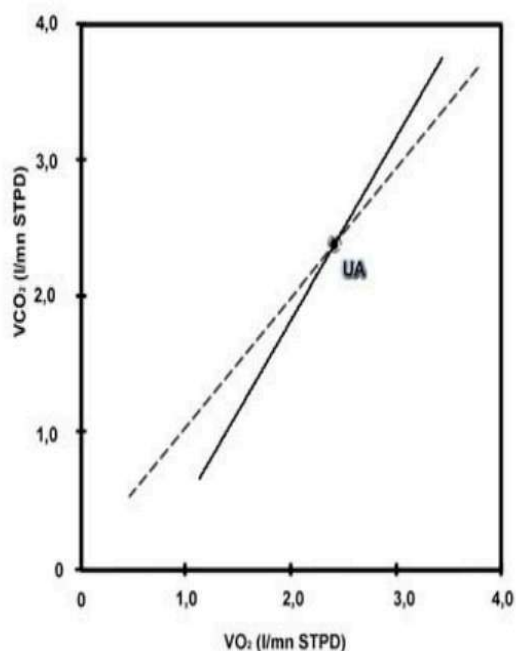


FIGURA 7

Figura 7. Relación entre el volumen de oxígeno consumido (VO_{2STPD}) y el volumen de bióxido de carbono eliminado (VCO_{2STPD}) a nivel alveolar, respiración por respiración (V-Slope). El momento en que aumenta la pendiente del VCO_2 , indica el umbral anaeróbico.

Todos estos eventos ocurren de una manera tal, que mientras el aumento del VO_2 permanece lineal con el incremento de la carga de trabajo, la relación VE / VCO_2 permanece sin modificación durante una o dos etapas más. Una vez alcanzada una determinada intensidad, aumentan tanto el VE / VO_2 como el VE / VCO_2 , pero éste de una manera más pronunciada. Análogamente la $PETO_2$ aumenta, sin cambios en la $PETCO_2$. Después se observa un aumento de la $PETO_2$ y una disminución de la $PETCO_2$. El R suele rebasar el valor de 1.0, revelando una compensación respiratoria, de la acidosis metabólica (8), ocurriendo esto en niveles de trabajo por encima del VT_2 y el UL (4mmol/l). La técnica de la V-Slope es particularmente útil en pacientes con EPOC, quienes presentan $PaCO_2$ elevadas, porque en estos pacientes la ventilación no aumenta proporcionalmente al VCO_2 , y dada esta respuesta, la V-Slope es muy útil para establecer el umbral anaeróbico en ellos (12, 13). En la actualidad se han implementado otras técnicas para precisar aún más lo relativo a los múltiples cambios que ocurren en la transición de un metabolismo aeróbico, a otro cada vez más anaeróbico, con el objeto de poder contar con más elementos de juicio al momento de aplicar estos conceptos en el entrenamiento deportivo o en la rehabilitación médica.

En la década de 1980, el profesor Francesco Conconi (14) desarrolló un método sencillo conocido como "test de Conconi", para determinar la respuesta de la frecuencia cardíaca (FC) a intensidades crecientes y continuas de carrera en tramos de 200m. El punto de deflexión de ésta, en sujetos entrenados, lo asociaba con el umbral anaeróbico y correspondía alrededor del 90% de la capacidad máxima de rendimiento, (figura 8). Estudios ulteriores (15, 16, 17) sugirieron que dicha deflexión no era constante en todos los sujetos, e incluso, en un mismo sujeto podía variar de acuerdo al protocolo de medición utilizado.

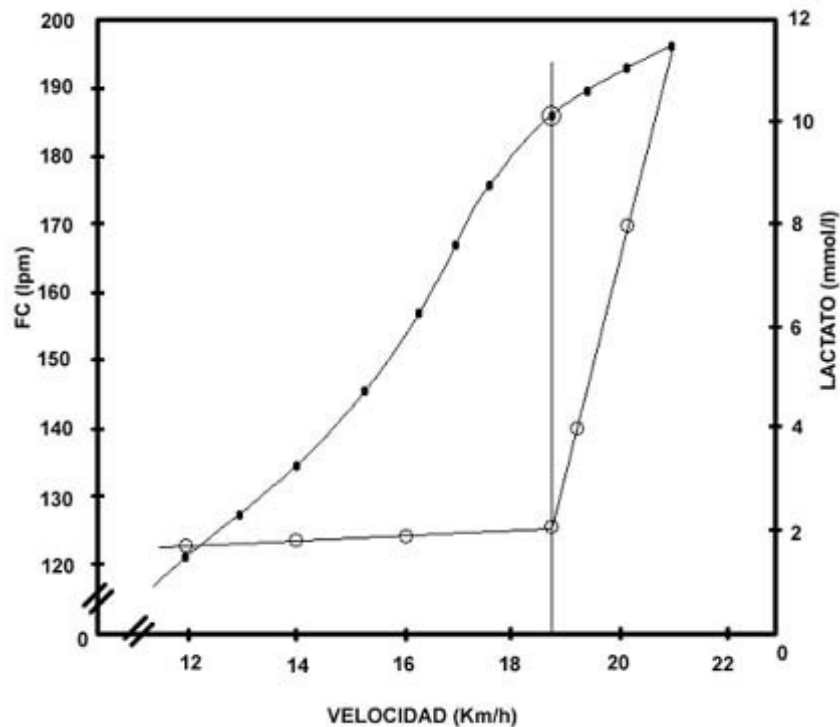


FIGURA 8

Figura 8. Punto de deflexión de la FC en un sujeto bien entrenado al 88% del rendimiento máximo. Coincide con un nivel de lactato de 4 mmol/l.

Posteriormente, el propio Conconi et al (18, 19) modificaron la metodología del test, incorporando análisis matemáticos que conferían mayor confiabilidad y validez a la prueba. Otros autores confirmaron estas mismas propiedades y su repetitividad en diversas actividades (20, 21, 22). Hoy en día es ampliamente utilizado en la prescripción y control del entrenamiento en deportistas de diferentes especialidades (23, 24), así como en pacientes incorporados a programas de rehabilitación. (25, 26)

En razón a todo lo expuesto, se puede concluir que lo más adecuado para establecer la transición del metabolismo aeróbico al anaeróbico, es la utilización de un método ecléctico que combine la mayor cantidad de variables posible, (figura 9).

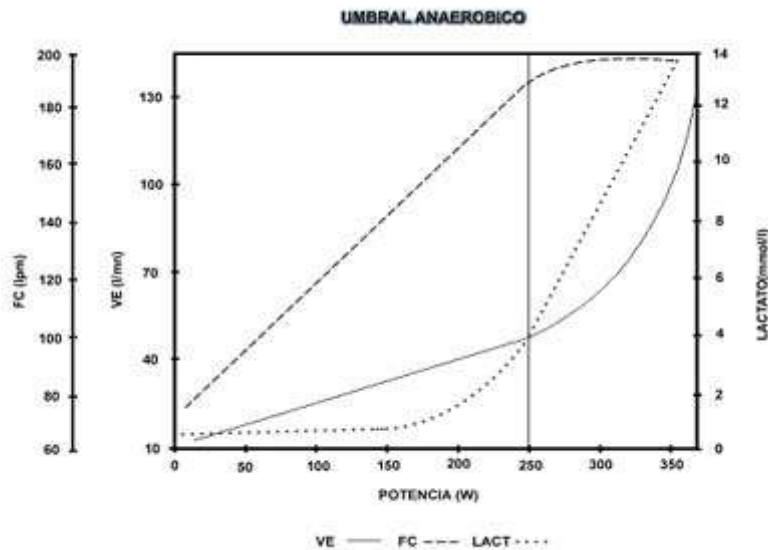


FIGURA 9

Figura 9. Esquema teórico de coincidencia en una misma carga de trabajo del umbral ventilatorio, umbral láctico y la deflexión de la frecuencia cardíaca.

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL UMBRAL ANAERÓBICO

Existen varios factores que inciden en la aparición más temprana o más tardía del umbral anaeróbico (27), entre ellos podemos mencionar:

1. Masa muscular activa.
2. Tipo de fibra muscular predominante.
3. Estado de entrenamiento del sujeto.
4. Ergómetro utilizado.
5. Familiaridad del sujeto con el tipo de actividad seleccionada.
6. Protocolo incremental utilizado.
7. Estatus metabólico (concentración de glucógeno, reserva alcalina, otros)
8. Factores ambientales (temperatura, humedad relativa, viento)

Ausencia o presencia de trastornos cardiorrespiratorios (asma bronquial, EPOC, cardiopatía isquémica)

MÉTODOS PARA DETERMINAR EL UMBRAL ANAERÓBICO

En la determinación del umbral anaeróbico se han puesto en práctica diversos métodos, que, en líneas generales, pueden ser clasificados como métodos invasivos o directos, en los que se mide,

mediante tomas de muestras de sangre, la concentración plasmática o sanguínea de lactato y se establece la carga de trabajo o la intensidad relativa (%) en la que se alcanzan 4mmol/l, que se ha fijado como el mayor nivel que el lactato puede mantenerse en estado estable, mientras se mantengan constantes las condiciones en las que se alcanzó. Se considera que la mayoría de los sujetos sanos y entrenados, pueden mantener por períodos prolongados dicho valor de lactato, debido a que los mecanismos de regulación del equilibrio ácido-básico (producción, amortiguación, consumo y excreción) actúan con gran eficiencia (9, 28). Los métodos no invasivos o indirectos, fundamentan la determinación del umbral anaeróbico mediante el comportamiento de la ventilación y/o intercambio gaseoso a nivel pulmonar, con la carga de trabajo o la intensidad del ejercicio (1, 2, 7, 9, 12).

METODOS DIRECTOS

- Concentración de lactato en pruebas de campo (3, 4)
- OPLA: comienzo de la acumulación de lactato en plasma (5)
- OBLA: comienzo de la acumulación de lactato en sangre (6)

METODOS INDIRECTOS

- VE / VO₂ (1, 2)
- VT1 y VT2 (7)
- FC / intensidad del ejercicio (14, 18)

CONCLUSIONES

El "umbral anaeróbico" es un concepto complejo de gran difusión y uso en la evaluación de la respuesta cardiorrespiratoria al ejercicio. Su aplicabilidad tanto en el campo del entrenamiento deportivo como en el de la rehabilitación médica, se ha extendido por todo el mundo. Existen parámetros que se están incorporando en su estudio, como la P50, cambios en el contenido arteriovenoso de O₂ en la hemoglobina (Hb), saturación de O₂ de la Hb y otros más que pueden aportar valiosas informaciones, sobre todo cuando se controla el ejercicio en pacientes cardíacos y pulmonares. En los últimos años las posibilidades de la evaluación fisiológica han crecido de una manera extraordinaria por los grandes avances tecnológicos. No cabe ninguna duda que en los próximos años se acrecentará mucho más el conocimiento en el campo de la investigación fisiológica y médica.

REFERENCIAS

1. Wasserman K, McIlroy MB. Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise, Am J Cardiol, 1964; 14:844-852.
2. Wasserman K, Van Kessel AL, Burton GG. Interaction of physiological mechanisms during exercise. J Appl Physiol, 1967; 22:71-85.

3. Mader A, Liesen H, Heck H, Philippi H, Rost R, Schurch PA, Hollmann W. Zur beurteilung der sportartsspezifischen ausdauerleistungsfähigkeit im labor. *Sportarzt sportmed*, 1976; 27:80-88.
4. Heck H, Mader A, Hollmann W. Evaluación del rendimiento en el laboratorio y en el campo. En Rittel HF (ed) *Sistema cardiorrespiratorio y deporte*. Copiservicio, Medellín, 1980; pp 197-224.
5. Farrell PA, Wilmore JH, Coyle EF, Billings JE, Costill DL. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports*, 1979; 11:338-344.
6. Sjôdin B, Jacobs I. Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int J Sports Med*, 1981; 2:23-26.
7. Orr GW, Green RL, Hughson RL, Bennett GW. A computer linear regression model to determine ventilator anaerobic threshold. *J Appl Physiol*, 1982; 52:1349-1352.
8. Davis JA. Anaerobic threshold: review of concept and directions for future research. *Med Sci Sports Exercise*, 1985; 17:6-18.
9. Wasserman K. Anaerobiosis, lactate and gas exchange during exercise issues. *Federation Proc*, 1986; 45:2409-2416.
10. López Chicharro JL, Legido JC. Umbral Anaeróbico. Bases fisiológicas y aplicaciones. Interamericana-McGraw-Hill, Madrid, 1991, pp 63-67.
11. Skinner JS, McLellan T. The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Res Q Exer Sport*, 1980; 51:234-248.
12. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol*, 1986; 60:2020-2027.
13. Wasserman K, Beaver WL, Whipp BJ. Gas exchange theory and the lactic acidosis (anaerobic) threshold. *Circulation*, 1990; 81(suppl 1):II14-II30.
14. Conconi F, Ferrari M, Ziglio PG, Droghetti P, Codeca L. Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners. *J Appl Physiol*, 1982; 52:869-873.
15. Ribeiro JP, Fielding RA, Hughes V, Black A et al. Heart rate break point may coincide with the anaerobic threshold and not the aerobic threshold. *Int J Sports Med*, 1985; 6:220-224.
16. Kuipers H, Keizer HA, DeVries T, Van Reithoven P, Wiggins C. Comparison of heart rate as a noninvasive determinant of anaerobic threshold with the lactate threshold when cycling. *Eur J Appl Physiol*, 1988; 58:303-306.
17. Francis KT, McClatchey PR, Sumsion JR, Hamsen DE. The relationship between anaerobic threshold and heart rate linearity during cycle ergometry. *Eur J Appl Physiol*, 1989; 59:273-277.
18. Conconi F, Grazzi G, Casoni I, Guglisimi G, Borsetto C, Ballarin E, et al. The Conconi test: methodology after 12 years of application. *Int J Sports Med*, 1996; 17:509-519.
19. Grazzi G, Casoni I, Mazzoni G, Uliari S, Conconi F. Protocol for the Conconi test and determination of the heart rate deflection point. *Physiol Rev*, 2005; 54:473-475.

20. Celik O, Kosar SN, Korkusuz F, Bozkurt M. Reliability and validity of the modified Conconi test on concept II rowing ergometers. *J Strength Con Res*, 2005; 19:871-877.
21. Grazzi G, Casoni I, Mazzoni G, Manfredini F, Uliari G, Conconi F. On the methodology Conconi test. *Int J Sports Med*, 2005; 26:397-398.
22. Vachon JA, Bassett DR Jr, Clarke S. Validity of the heart rate deflection point as a predictor of lactate threshold during running. *J Appl Physiol*, 1999; 87:452-459.
23. Lucia A, Hoyos J, Chicharro JL. Physiology of professional road cycling. *Sports Med*, 2001; 31:325-337.
24. Fernandez-Pastor VJ, Pèrez F, Garcia JC, Diego AM, Guirado F, Noquer N. Maintenance of the threshold/maximum heart rate quotient in swimmers. *Rev Esp Fisiol*, 1997; 53:327-334.
25. Manfredini F, Mangolini C, Mascoli F, Mazzoni G, Cristina M, Manfredini R, Conconi F. An incremental test to identify the pain threshold speed in patients with intermittent claudication. *Circ J*, 2002; 66:1124-1127.
26. Bodner ME, Rhodes EC. A review of the concept of the heart rate deflection point. *Sports Med*, 2000; 30:31-46.
27. Subiela J. El umbral anaeróbico. *Boletín Internacional de Educación Física*, 1982; 3:11-16.
28. Mader A, Heck H. A theory of the metabolism origin of áanaerobic threshold?. *Int j Sports Med*, 1986; 7:45-65.