

TRABAJO FINAL DE GRADO.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Metodologías de valoración del umbral anaeróbico aplicado al atletismo de fondo.

Alumno: José Serrano Pérez. Tutor académico: José Manuel Sarabia Marín. Titulación: Grado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte. Curso académico: 2014-2015.



Índice

Contextualización	1
Procedimiento de revisión	2
Revisión Bibliográfica	4
Discusión	10
Propuesta de intervención	15
Bibliografía	15

Contextualización

En la actualidad existen diversos métodos que se utilizan para calcular el umbral anaeróbico de un deportista, lo cual es de especial interés en modalidades como el atletismo de fondo. Sin embargo, existe controversia a la hora de decidir cuál es mejor teniendo en cuenta factores como precisión, tiempo, economía o material. Para empezar, es importante definir dicho umbral, factores implicados y su importancia en el rendimiento.

El umbral anaeróbico se define como la carga de trabajo o consumo de oxígeno a partir de la cual se comienza a instaurar un estado de acidosis metabólica y ocurren cambios asociados en el intercambio gaseoso (Wasserman y McIlroy, 1964)^[14]. Una vez que el ácido láctico comienza a producirse de forma importante en las células musculares más glucolíticas y abandona la célula muscular, se disocia rápidamente a pH fisiológico, dando lugar a una liberación de iones de hidrógeno, éstos son amortiguados por los sistemas tampón del organismo manteniendo constante el pH. Este tamponamiento puede tener lugar en las propias células del músculo esquelético, en los hematíes o en el plasma; y puede ocurrir por combinación con proteínas o por interacción con el sistema bicarbonato u otros sistemas tampón menos importantes. La reacción de los H^+ con el HCO_3 da como resultado, la producción de un exceso de CO_2 ^[14].

La vía aeróbica u oxidativa tiene como productos finales CO_2 y H_2O , y por tanto una vez que la vía glucolítica comienza a participar de forma significativa en la producción de ATP durante el ejercicio, habrá dos fuentes de CO_2 generándose de forma simultánea: una correspondiente a la vía aeróbica y otra correspondiente a la amortiguación de los H^+ generados como consecuencia de la producción de ácido láctico por las células musculares activas. La consecuencia fisiológica será un aumento de la ventilación pulmonar con la finalidad de eliminar CO_2 del organismo contribuyendo con ello a la regulación de pH durante el ejercicio^[14].

Cuando se desarrollan altas intensidades de trabajo físico, la producción de H^+ como consecuencia del aumento del ácido láctico, excede con mucho la capacidad de los sistemas tampón de amortiguación. Por tanto, el pH de la sangre en esas condiciones descenderá, lo que provocará una estimulación adicional del centro respiratorio con la finalidad de aumentar la ventilación pulmonar, eliminando más CO_2 como compensación respiratoria de la acidosis^[14].

El umbral anaeróbico nos proporciona información sobre el tiempo que nuestro deportista es capaz de aguantar realizando un ejercicio a una intensidad concreta. Es

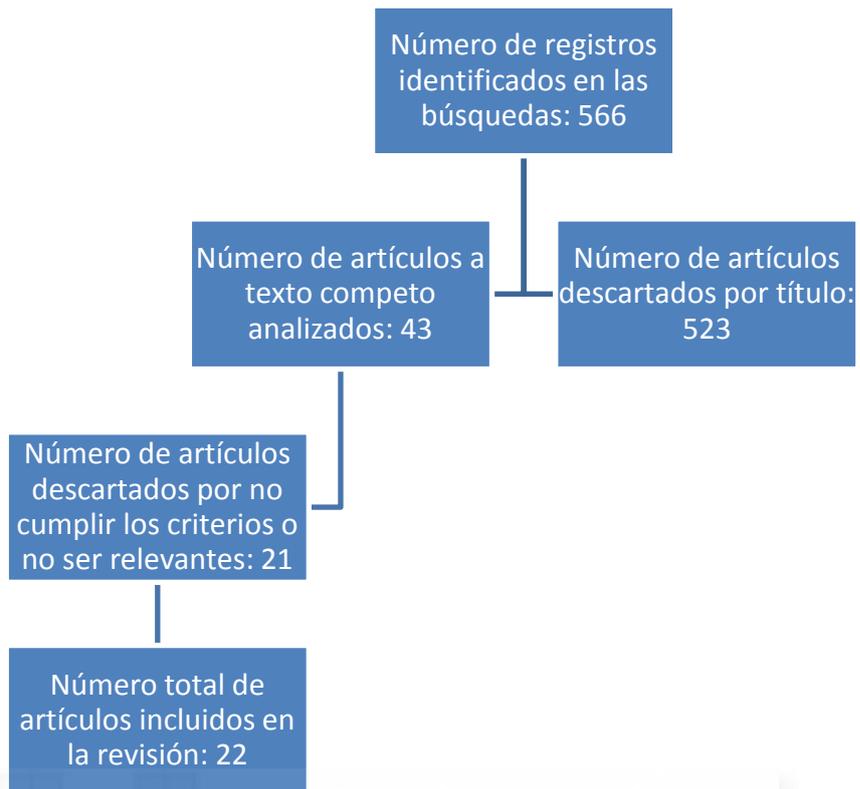
importante retrasar el momento en el que se alcanza este umbral lo máximo posible, haciendo que nuestro deportista pueda aguantar más tiempo a una intensidad más alta. Una vez superada la intensidad de ejercicio en la que se encuentra dicho umbral, el ácido láctico comienza a acumularse en la sangre y el deportista no tarda en detenerse o bajar el ritmo. En disciplinas como el atletismo de fondo, se planifican entrenamientos con intensidades cercanas a dicho umbral, o por encima del mismo en el caso de los entrenamientos interválicos, para mejorar el Uan. Así, el umbral anaeróbico de un deportista nos proporciona información para poder evaluar, planificar e individualizar mejor un entrenamiento pudiendo establecer distintas zonas de intensidad ^[8].

El cálculo del umbral anaeróbico suele hacerse a través de tests incrementales donde se miden diversos parámetros como el consumo de oxígeno, producción de dióxido de carbono y/o frecuencia cardiaca, entre otros. Estos parámetros guardan una estrecha relación con el punto en el que el ácido láctico pierde su linealidad. Por tanto, que la forma de hallar el umbral anaeróbico sea mediante el estudio de estas variables, hace que un test de laboratorio tenga mayor validez y fiabilidad que un test de campo ^[12].

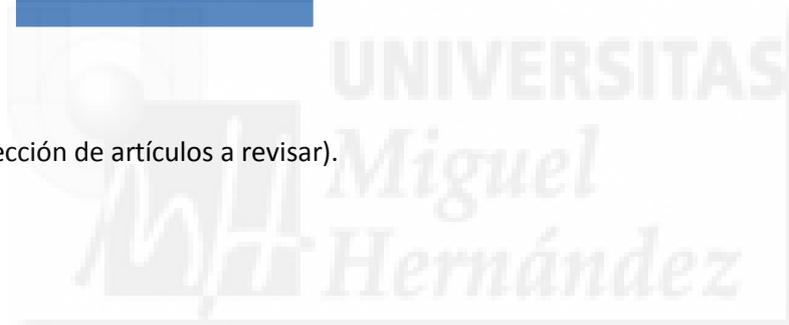
En la siguiente revisión de artículos de los últimos 10 años, se hará una comparación de los distintos métodos con los de lactato, considerándolos el gold standard. Después se harán comparaciones entre el resto de métodos para determinar cuáles son los más válidos y fiables para calcular el umbral anaeróbico y cuáles serían los más idóneos para aplicar al atletismo de fondo en función de factores económicos, de eficiencia y de accesibilidad.

Procedimiento de revisión

La búsqueda de artículos a revisar se realizó en las bases de datos de www.PubMed.com y www.ScienceDirect.com. Los criterios de selección excluían artículos de más de diez años de antigüedad, artículos con intervenciones en animales y artículos en los que la muestra estudiada incluía personas con alguna patología. Se descartaron también artículos en los que se utilizaban ergómetros distintos al tapiz rodante o al ciclo-ergómetro. Se excluyeron pues artículos enfocados a deportes como la natación, el remo o deportes de perfil intermitente. Las palabras siguientes y sus combinaciones fueron empleadas en la búsqueda: “Anaerobic threshold”, “Respiratory exchange ratio”, “Lactate threshold”, “V-slope”, “EqO₂”, “RPE”, “OBLA”, “Dmax”, “Maximal lactate steady state”, “Heart rate deflection point”, “Ventilatory threshold”, “Critical power” y “Critical velocity”. Finalmente se incluyeron 22 artículos científicos en los que se comparaban distintos métodos de obtención del umbral anaeróbico, basándose en la frecuencia cardíaca, la frecuencia ventilatoria o el lactato en sangre entre otros. (Figura 1).



(Figura 1. Selección de artículos a revisar).



Revisión bibliográfica

Autor	Muestra	Protocolo	Método	Resultados
Bergstrom et al. (2013).	N=28 deportistas amateurs. (14: Varones) (14: mujeres)	Test incremental en ciclo-ergómetro. Inicio: 50W. Incrementos de 30 cada 2 minutos.	Potencia crítica, v-slope, EqO ₂ , y punto de compensación respiratoria.	Tras comparar la potencia crítica obtenida tras una prueba de 3 minutos con otros métodos para calcular el Uan; se observa que existe una alta correlación entre CP y RCP (r=0.91, P<0.05). También existe correlación entre V-slope y EqO ₂ (r=0.94, P<0.05). Pero los valores de potencia de CP y RCP son significativamente mayores que los de V-slope y EqO ₂ .
Buchheit et al. (2007).	N=72 varones (Niños deportistas)	Test incremental en tapiz rodante. Inicio: 6km/h. Incrementos de 1km/h cada minuto.	EqCO ₂ , punto de inflexión de la frecuencia cardiaca y variabilidad de la FC.	La variabilidad de la frecuencia cardiaca se correlaciona con el umbral ventilatorio (r = 0.75, P<0.001), lo que sugiere que el Uan se puede calcular mediante este parámetro en niños.
Costa-Sotelo et al. (2011).	N=11 varones. (Atletas adolescentes)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 3000m máxima velocidad. 2. 500m máx v + 10' recuperación pasiva + 6x800m a 83, 86, 89, 82, 95 y 98% V3000m. 3. 500m máx v + 10' recuperación pasiva + 3x800m a 83, 89, y 98% V3000m. 	LM, Mv3000, LMp y LMp3.	Se pudo detectar la velocidad correspondiente a la mínima cantidad de lactato con todos los protocolos (0.74<r<0.94, P<0.01), lo cual quiere decir que se pueden conseguir los mismos objetivos como procedimientos más sencillos.

Debray et al. (2007).	N= 26 varones. (Niños)	Test incremental en tapiz rodante. Inicio: 4km/h. Pendiente: 2%. Incrementos de 1km/h cada minuto.	Equivalentes ventilatorios, RER y punto de inflexión FC.	El punto de inflexión de la frecuencia cardiaca coincide con el umbral ventilatorio en el 76.5% de los sujetos (r=0.94, P<0.01).
Fabre et al. (2013).	N=21 (13: Varones) (8: Mujeres)	Test incremental en ciclo-ergómetro. Inicio: 70W durante 5 minutos. Incrementos de 30W/3min.	RPE y Dmax.	El RPE es un buen predictor del Uan. RPE tiene una correlación muy fuerte con Dmax: (r = 0.97, P < 0.001)
Gamelin et al. (2006).	N=12 varones. (Atletas de media y larga distancia)	1. 3 tests en pista (6, 9 y 12min) para recorrer la máxima distancia posible. 2. 2 tests de velocidad en pista. 2x30m con recuperación pasiva de 5 minutos. 3. Test de 1h en pista para recorrer la máxima distancia posible.	Velocidad crítica y métodos de Housh et al. para estimar la CV.	El análisis del intervalo de confianza para resultados esperados y obtenidos revelaba que ningún modelo estimaba adecuadamente la velocidad crítica para pruebas de 1h de duración.
Higa et al. (2007).	N=29 mujeres. (13: Jóvenes) (16: Postmenopáusicas)	Test incremental en ciclo-ergómetro. Inicio: 4W. Incrementos de 10-20W/min.	CT-R, V-slope, punto de compensación respiratoria y punto de inflexión de la frecuencia cardiaca.	Se observa correlación entre V-slope y el modelo matemático planteado aplicado a FC y a VCO ₂ . (r=0.75, P<0.05 y r=0.78, P<0.05 respectivamente).
Karapentian et al. (2008).	N=24 (9: Varones), (15: Mujeres)	Test incremental en ciclo-ergómetro. Inicio: 25W. Incrementos de 25W cada 3 minutos.	Variabilidad de la FC, Equivalentes ventilatorios, OBLA y V-slope.	Existen correlaciones entre la variabilidad de la frecuencia cardiaca con VT y LT (r=0.82, r=0.89, P<0.05).

Keir et al. (2014).	N=12 varones.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Test incremental en ciclo-ergómetro. Inicio: 20W. Incrementos de 25W/min. 2. 2-3 tests de potencia constante de 30min. 3. 4-5 tests para determinar la potencia crítica. 	Potencia crítica, RCP, MLSS y [HHb] _{BP}	No hay diferencias ($p>0.05$) entre CP, RCP, MLSS y [HHb] _{BP} respecto a los valores de VO_2 . Pero respecto a la potencia, [HHb] _{BP} y RCP mostraban valores superiores ($P<0.05$) a MLSS y CP. Estos últimos no eran diferentes entre sí ($P>0.05$)
Lopes-Motoyama et al. (2013).	N=14 varones	<ol style="list-style-type: none"> 1. Test de 3000m y de 500m en pista. 2. Test incremental en tapiz rodante. Inicio: 65% de la V del 3000m. Incrementos de 0.5km/h cada 3min. 3. 2-5 tests de 30min a V 5% por debajo de GT. En cada test se aumentaba la velocidad un 5%. 	MLSS, umbral individual de lactato, GT, velocidad crítica.	El cálculo del umbral individual de lactato y GT guardan correlación con el MLSS ($r=0.82$, $P<0.01$ y $r=0.72$, $P<0.01$ respectivamente). Sin embargo, existen diferencias significativas entre los métodos de MLSS y velocidad crítica en varones sanos.
Mielke et al. (2011)	N=15 Mujeres (4: sedentarias) (11: deportistas)	Test incremental en ciclo-ergómetro. Inicio: 50W. Incrementos de 30W cada 2 minutos.	Potencia crítica, FC crítica, V-slope y punto de compensación respiratoria.	El test de FC crítica muestra correlación con el punto de compensación respiratoria ($r=0.83$, $P<0.05$) y con el V-slope ($r=0.76$, $P<0.05$)
Nikoodie et al. (2009).	N=15 varones sanos.	Test incremental en tapiz rodante. Inicio: 6km/h. Incrementos de 1km/h cada minuto.	OBLA, %SpO ₂ , RER, V-slope y EqO ₂ .	Es posible estimar de forma precisa el umbral anaeróbico monitorizando el %SpO ₂ . De los métodos empleados el RER muestra mayor correlación con OBLA. %SpO ₂ ($r=0.67$), RER ($r=0.76$), V-slope ($r=0.66$) y EqO ₂ ($r=0.74$). ($P<0.05$).

Okuno et al. (2011).	N=10 varones. (Estudiantes)	1. Test incremental en ciclo-ergómetro. Inicio: 30W. Incrementos de 30W/min. 2. 4 tests de CP 2-15min. 3. 4 tests intermitentes de CP ratio 30":30".	Potencia crítica, MLSS y RPE	Los resultados de test de potencia crítica con ratio 30":30" se correlaciona con los datos obtenidos del MLSS (r=0.88, P<0.05) Se concluye que el test intermitente de potencia crítica es válido para predecir el Uan de deportistas varones jóvenes.
Plato et al. (2008).	N=19 ciclistas. (10: Varones) (9: Mujeres)	Test incremental en ciclo-ergómetro. Resistencia inicial 1.5kg (varones) y 1kg (mujeres). Incrementos de 0.25kg o 0.5kg cada 1-2min en función de la respuesta metabólica y de la FC. Cadencia libre entre 80 y 100 rpm.	V-slope y Dmax.	Los valores de FC en el umbral ventilatorio subestiman los valores de ésta en el umbral de lactato. La correlación entre los valores de FC fue de r=0.67 (P<0.001).
Rodríguez-Mayorro et al. (2013).	N=18 varones (Ciclistas de élite)	2 tests incrementales en ciclo-ergómetro. Inicio: 75W. Incrementos de 50W/min.	Equivalentes ventilatorios, punto de compensación respiratoria, y Talk Test.	Talk Test es un método válido en ciclistas de élite. EQ (Equivocal stage) y LEQ (Last equivocal stage), se correlacionan con el umbral ventilatorio (r=0.86, P<0.01) y con el punto de compensación respiratoria (r=0.94, P=0.01) respectivamente.
Santos-Concejero et al. (2014).	N=22 varones (11: 10km) (11: 3km)	Test incremental en tapiz rodante. Inicio: 9km/h. Incrementos de 1.5km/h cada 4 minutos.	OBLA y Dmax.	Tanto OBLA como Dmax tienen una alta correlación en corredores de media y larga distancia. Dmax: S _{10km} (r=0.873, P<0.001) y S _{3km} (r=0.825, P<0.001). OBLA: S _{10km} (r=0.919, P<0.001) y S _{3km} (r=0.849, P<0.001).
Scherr et al. (2012).	N=2560 (1796: Varones)	Test incremental escalonado en tapiz rodante y ciclo-ergómetro. Inicio 25-100W o 4-8km/h en función de la máxima capacidad esperada del sujeto. Incrementos de 20-50W	MLSS y RPE.	Correlación significativa entre RPE y MLSS. (r=0.84, P<0.001)

	(764: Mujeres)	o 1-2km/h cada 3 minutos.		
Sentija et al. (2007).	N=51 varones. (11: Sprinters) (14: 400m) (11: Medio fondo) (15: fondistas)	1. Test incremental estándar (TSTAND) en tapiz rodante. Inicio: 3km/h. Pendiente: 1.5%. Incrementos de 1km/h cada minuto. 2. Test incremental rápido (TFAST) en tapiz rodante. Inicio: 3km/h. Pendiente: 1.5%. Incrementos de 1km/h cada 30 segundos.	Punto de inflexión de la frecuencia cardiaca y punto de inflexión de la velocidad.	El HR _{DP} determinado con ambos protocolos muestra una correlación de r=0.92, (P<0.001). Sin embargo, el punto de inflexión de la velocidad es más dependiente del protocolo empleado.
Solberg et al. (2005)	N=12 varones. (Deportistas entrenados)	1. N=6: Test incremental en tapiz rodante. Inicio: 8km/h. Incrementos de 2km/h cada 2 minutos. 2. N=6: Test incremental en ciclo-ergómetro. Inicio: 150W. Incrementos de 50W cada 3 minutos.	IAT, EqO ₂ , RER y V-slope.	Los resultados indican una mejor correlación entre el RER y IAT que entre IAT y los otros métodos. RER-LT: (r=0.87, P<0.001). EqO ₂ -LT: (r=0.45, P<0.05). V-slope-LT: (r=0.42, 0.05).
Souza et al. (2011).	N=9 varones (Fondistas moderadamente entrenados)	Test incremental en tapiz rodante. Inicio 10km/h. Incrementos de 1km/h cada 3 minutos.	MLSS, OBLA, LM, IAT y Dmax.	Correlaciones con respecto al MLSS: OBLA (r=0.68, P<0.04), IAT (r=0.79, P<0.01)

Viera-Browne et al. (2015).	N=25 varones. (Atletas de media y larga distancia)	1. 3000m máxima velocidad. 2. 1600m máxima velocidad. 3. 500m máx v + 10' recuperación pasiva + 6x800m a 83, 86, 89, 82, 95 y 98% V3000m.	Velocidad de lactato mínimo y velocidad crítica.	La velocidad crítica se correlaciona con la velocidad de lactato mínima. No se muestran diferencias significativas entre estos (P=0.305).
Vučetić et al. (2014).	N=48 varones de ranking nacional. (10: Sprinters) (15: 400m) (10: Medio fondo) (13: fondistas)	1. Test incremental estándar en tapiz rodante. Inicio: 3km/h. Pendiente: 1.5%. Incrementos de 1km/h cada minuto. 2. Test incremental rápido en tapiz rodante. Inicio: 3km/h. Pendiente: 1.5%. Incrementos de 1km/h cada 30 segundos.	V-slope, equivalentes ventilatorios y punto de inflexión de la frecuencia cardiaca.	Existe correlación entre HR _{VT} y HR _{DP} en ambos protocolos (r=0.88, P<0.01 en Test rápido y r=0.83, P<0.01 en Test estándar).

CP = Potencia crítica, CV = Velocidad crítica, EqCO₂ = Equivalente de dióxido de carbono, EqO₂ = Equivalente de oxígeno, FC = Frecuencia cardiaca, GT = Umbral de glucosa, [HHb]_{BP} = Punto de saturación de la oxihemoglobina, HR_{DP} = Punto de inflexión de la frecuencia cardiaca, IAT = Umbral anaeróbico individual, LM = Lactato mínimo, LMP = Lactato mínimo polinómico usando seis series, LMP3 = Lactato mínimo polinómico usando tres series, LT = Umbral de lactato, MLSS = Máximo estado estable de lactato, Mv3000 = Velocidad media en el test de 3000m corriendo, OBLA = Inicio de acumulación de lactato en sangre, RCP = Punto de compensación respiratoria, RER = Cociente respiratorio, RPE = Percepción subjetiva de esfuerzo, %SpO₂ = Porcentaje de saturación de oxígeno, VT = Umbral ventilatorio.

Discusión

Los principales métodos de detección del umbral anaeróbico se dividen en tres grandes grupos: los métodos de lactato, los ventilatorios y los que utilizan la frecuencia cardiaca. La mayoría de métodos que se utilizan en los artículos incluidos tras la revisión se engloban dentro de estos tres grupos, aun así hay algunos que no se pueden englobar de esta forma. Estos métodos se describen a continuación.

Métodos en base a la concentración de lactato en sangre

Estos métodos se consideran los más válidos y fiables ya que miden directamente el lactato en sangre tomando muestras del lóbulo de la oreja. El problema de éstos es su carácter invasivo y que no son accesibles para muchos deportistas ya que requieren de material y personal especializado. En esta revisión se han incluyen los siguientes:

- *MLSS (Maximal Lactate Steady State)* se define como la más alta concentración de lactato sanguíneo compatible con un equilibrio entre la tasa de producción de lactato, respecto a su aclaramiento, durante un ejercicio de carga constante ^[14]. Ha sido utilizado en 5 trabajos incluidos en esta revisión ^[12, 13, 17, 21, 24].
- *Onset of Blood Lactate Accumulation (OBLA)* expresa el nivel máximo de lactato en sangre compatible con un estado estable, es decir, el mayor VO_2 o intensidad de ejercicio que puede mantenerse durante un tiempo prolongado sin un incremento continuado de la concentración de lactato sanguíneo ^[14]. Ha sido utilizado en 4 trabajos incluidos en esta revisión ^[11, 16, 20, 24].
- *Dmax*. Este método consiste en establecer una regresión curvilínea de tercer orden con los valores obtenidos de la concentración de lactato durante un test incremental. Una vez establecida la curva se traza una recta entre los dos puntos finales de la misma y se calcula la distancia correspondiente de todos los puntos de la curva con la recta resultante. El punto de la curva a mayor distancia de la recta es considerado como el correspondiente al umbral láctico ^[14]. Ha sido utilizado en 4 trabajos incluidos en esta revisión ^[6, 18, 20, 24].
- *Individual Anaerobic Threshold (IAT)* se define como la tasa metabólica donde la eliminación de lactato de la sangre es máxima e igual a la tasa de difusión del lactato desde el músculo activo a la sangre, por lo que la realización de mayores intensidades de ejercicio llevará progresivamente a una acumulación de lactato en sangre. Se representa como la carga de trabajo o el VO_2 correspondiente al punto de la curva de lactato cortado por una tangente con una angulación de 51° según Keul y col, 1979 o de 45° según Simon y col, 1981 ^[14]. Ha sido utilizado en 3 trabajos incluidos en esta revisión ^[13, 23, 24].
- *Lactate Minimum (LM)* hace referencia al punto de equilibrio entre la producción de lactato y su aclaramiento durante un test incremental posterior a un ejercicio de alta intensidad (Tegtbur et al.) ^[14]. Ha sido utilizado en 3 trabajos incluidos en esta revisión ^[4, 24, 25].

Métodos en base al intercambio respiratorio

De forma general, se determinan cuando las variables de intercambio respiratorio experimentan una modificación en su respuesta. El problema de los diferentes métodos estriba en el considerable componente de subjetividad. Al ser métodos visuales, la manera en la que el investigador observa las variaciones que se producen en el comportamiento de los diferentes parámetros es de vital importancia^[14]. Dentro de los métodos ventilatorios, en esta revisión se ha investigado sobre los siguientes:

- *Respiratory Exchange Ratio (RER)* o cociente respiratorio, se define como la relación existente entre la cantidad de CO₂ espirado y la cantidad de O₂ consumido por minuto ($R=VCO_2/VO_2$). El umbral anaeróbico se encuentra en el punto en que el RER llega a la unidad y tanto el VO₂ como el VCO₂ se equiparan^[14]. Ha sido utilizado en 3 trabajos incluidos en esta revisión^[5, 16, 23].
- *Equivalentes de oxígeno y dióxido de carbono (EqO₂ y EqCO₂)* se definen como la relación entre la ventilación y el VO₂ o el VCO₂ según el caso ($EqO_2=VE/VO_2$, $EqCO_2=VE/CO_2$). Los equivalentes disminuyen durante las primeras fases del ejercicio incremental, y a medida que la intensidad aumenta se puede observar una elevación continuada de sus valores. Llega un momento en el que la intensidad del ejercicio provoca un aumento excesivo de la ventilación, lo que implica un aumento de los valores de los equivalentes ventilatorios. Esta intensidad es identificada como el umbral anaeróbico. Ha sido utilizado en 8 trabajos incluidos en esta revisión^[1, 3, 5, 11, 16, 19, 23, 26].
- *Punto de Compensación Respiratoria (RCP)* hace referencia al punto en el que el EqCO₂ comienza a aumentar^[14]. Ha sido utilizado en 5 trabajos incluidos en esta revisión^[1, 9, 12, 15, 19].
- *V-slope* es una técnica para valorar el umbral ventilatorio durante ejercicios incrementales, determinando simultáneamente el VO₂ y el VCO₂ alveolares respiración a respiración. Mide producción de CO₂ en relación con el VO₂, a medida que aumenta la intensidad de ejercicio. El VO₂ es una variable independiente que mide directamente el metabolismo aeróbico y el VCO₂ por debajo del umbral láctico aumenta linealmente con el VO₂. Pero a mayores intensidades de ejercicio, la pendiente se incrementa debido al VCO₂ añadido y generado por la amortiguación del ácido láctico por el bicarbonato. Este segundo componente en la relación VO₂-VCO₂ es también lineal. El punto de la gráfica en el que se produce la modificación de la pendiente y que corresponde a la transición en la relación VO₂-VCO₂ es, de acuerdo con estos análisis, el umbral ventilatorio^[14]. Ha sido utilizado en 8 trabajos incluidos en esta revisión^[1, 9, 11, 15, 16, 18, 23, 26].
- *Porcentaje de saturación de oxígeno (%SPO₂)* hace referencia a la cantidad de oxígeno transportado en la hemoglobina en un determinado momento. El umbral anaeróbico se considera el punto en el que este porcentaje desciende de forma abrupta^[16]. Ha sido utilizado en 1 trabajo incluido en esta revisión^[16].

Métodos en base a la frecuencia cardiaca

- Estos métodos relacionan la *frecuencia cardiaca* del sujeto con la intensidad del ejercicio. Tienen la ventaja de no ser invasivos y no requieren personal ni material especializado. Solamente se requiere un pulsómetro que se puede comprar en cualquier tienda deportiva. El comportamiento de la frecuencia cardiaca durante un test incremental es sigmoideo con una fase inicial más o menos plana, una zona intermedia lineal, y una zona de aplanamiento en las intensidades cercanas al máximo. Esa zona de cambio de la parte central lineal a la zona de aplanamiento final es en la que, según Conconi et al. (1982)^[10], ocurre a una potencia que correspondería a la misma en la que se produce el incremento exponencial del lactato máximo, y proponen el método de determinación de la velocidad en el UAn, por medio de la detección del punto de inflexión de la frecuencia cardiaca^[10]. Este punto ha sido utilizado en 6 trabajos incluidos en esta revisión^[2, 5, 9, 11, 22, 26].
- *Frecuencia cardiaca crítica* fue definida por Mielke et al.^[15] como la pendiente de la recta de regresión que se forma al comparar el número límite de latidos con el tiempo límite durante un test incremental. El número límite de latidos se calculó como el producto de la media de latidos tomados cada 5 segundos por el tiempo total^[15]. Ha sido utilizado en 1 trabajo incluido en esta revisión^[15].
- *Variabilidad de la frecuencia cardiaca*: tiempo en milisegundos que transcurre entre dos latidos del corazón. El aumento de la intensidad de ejercicio resulta en un aumento de la FC y una disminución de la variabilidad de la FC. Este intervalo no es constante y varía entre un latido y el siguiente. Ha sido utilizado en 2 trabajos incluidos en esta revisión^[2, 11].

Otros métodos

- Dentro de este grupo podríamos incluir los métodos de detección del umbral anaeróbico mediante la percepción subjetiva del esfuerzo. Estos métodos utilizan el RPE durante un test incremental para detectar el umbral anaeróbico. Durante el test incremental se le va enseñando al sujeto la escala de Borg (1996)^[3] al final de cada etapa y éste contesta con su percepción de esfuerzo en ese momento. Posteriormente los datos se analizan mediante gráficas, con el mismo método que se aplica en el Dmax para el umbral de lactato, y se identifica el punto que representa el umbral anaeróbico^[6]. Ha sido utilizado en 3 trabajos incluidos en esta revisión^[6, 17, 21].
- Incluimos también el Test del Habla como forma de cálculo del Uan. Como el RPE, se trata de un método económico y accesible pero demasiado subjetivo. Se trata de leer un texto o responder a una serie de preguntas durante el test incremental para valorar los puntos de intensidad en los que se produce un cambio brusco en la facilidad de hablar del sujeto. Es en este cambio donde se encuentra el umbral anaeróbico^[19]. Ha sido utilizado en 1 trabajo incluido en esta revisión^[19].
- Glucose Threshold (GT), se define como la velocidad en un test incremental donde los niveles de glucosa en sangre son mínimos. Las

muestras se toman tras cada escalón de intensidad. Igual que los métodos de lactato, el problema que plantea este método es que al ser invasivo es muy costoso y poco accesible. Ha sido utilizado en 1 trabajo incluido en esta revisión ^[13].

- El punto de inflexión de la desoxihemoglobina, es otro método que se basa en observar el VO_2 en el que la hemoglobina desoxigenada deja de incrementar y forma una meseta durante un test incremental ^[12]. Ha sido utilizado en 1 trabajo incluido en esta revisión ^[12].
- Por último, Velocidad o potencia crítica (CP y CV) se define como una velocidad máxima de ejercicio que se puede mantener durante un largo periodo de tiempo. Si se aumentase más esta velocidad, el sujeto no tardaría en acabar exhausto ^[1]. Se basa en el uso de protocolos de duración/distancia fija realizados a intensidad máxima. El más común es 3' all-out test, en el que los sujetos realizan tres minutos de ejercicio a máxima intensidad. Después se analizarían los datos mediante gráficas (intensidad-tiempo) y se consideraría la potencia o velocidad crítica la intensidad media de los últimos 30 segundos. Ha sido utilizado en 7 trabajos incluidos en esta revisión ^[1, 7, 12, 13, 15, 17, 25].

Comparaciones de los distintos métodos con el gold standard

Como se puede observar, existe un gran número de conceptos en los métodos de lactato. Aunque no existe un consenso en cuanto a la terminología y los métodos empleados entre los autores, al final todos aportan información válida y fiable sobre el umbral anaeróbico del sujeto que se estudia ^[14]. En la gran mayoría de artículos revisados, el gold standard utilizado fue alguno de los métodos basados en la concentración de lactato indicados anteriormente.

Dentro de los estudios que comparaban métodos de lactato y ventilatorios, el que mayor correlación mostraba con el umbral de lactato fue el RER. Éste presentaba una correlación de $r=0.87$, ($P<0.001$) en el estudio de Solberg et al ^[23]. Este estudio situaba al RER por delante del V-slope y el EqO_2 , los cuales indicaban un umbral anaeróbico por debajo de los valores que ofrecía el LT. En otros estudios de este tipo, como el de Nikoodie et al. ^[16], también se compararon varios métodos ventilatorios ($\%\text{SpO}_2$, RER, V-slope y EqO_2) con el umbral de lactato (OBLA). El RER fue de nuevo el que mayor correlación presentó ($r=0.76$, $P<0.05$) frente a los otros métodos.

El estudio que mayor relación presentaba entre los métodos de frecuencia cardiaca y los de lactato fue el de Karapentian et al. ^[11]. En este estudio se comparaba la variabilidad de la frecuencia cardiaca con el VT y el LT (Equivalentes ventilatorios, V-slope y IAT) en busca de un método más barato y menos invasivo para calcular el umbral anaeróbico. Las correlaciones entre los métodos fueron ($r=0.82$) con LT y ($r=0.89$) con VT, mostrando estos dos una alta correlación entre ellos. Se concluyó pues que el cálculo del Uan mediante este tipo de métodos era posible, pudiendo ser aplicado por un mayor número de gente por su carácter económico y no invasivo.

Otros métodos que mostraron una alta correlación con los de lactato fueron los basados en el RPE ^[6, 19, 21] y en la potencia crítica ^[1, 13, 15, 7, 12, 17, 25].

De los basados en el RPE, hubo 2 estudios que mostraban alta correlación con Dmax y con MLSS ($r=0.97$ y $r=0.84$ respectivamente). Estos parecen ser buenos predictores del Uan, además el segundo está respaldado por una muestra bastante amplia ($N=2560$), la mayor de la

revisión. En un principio se tomaba el RPE como complemento a los métodos de FC, pero una vez se conoce la relación entre frecuencia cardiaca y percepción de esfuerzo del sujeto ya se puede utilizar independientemente ^[6, 21].

En cuanto a los estudios que comparaban potencia crítica con los métodos de lactato, se incluyeron 2, ambos con resultados positivos. El primero comparaba la potencia crítica con el MLSS. Se mostraba una correlación de ($r=0.88$) y se concluía que el protocolo empleado para calcular la CP era válido para calcular el Uan de deportistas varones jóvenes ^[17]. Por otro lado en el estudio de Keir et al. ^[12], no se vieron diferencias significativas ($P>0.05$) entre las velocidades a las que se encontraban CP y MLSS. Esto sugiere que ambos parámetros representan un mismo punto fisiológico. Sin embargo, al contrario que en los estudios sobre RPE, las muestras eran muy pequeñas ($N=10$ y $N=12$), con lo que se debería realizar futuros estudios con una muestra más amplia. Además, aún hay controversias en cuanto a este método como se puede observar en el estudio de Lopes-Motoyama et al. ^[13], en el que se muestran diferencias significativas entre los métodos de MLSS y CV en varones sanos.

Comparaciones entre métodos

En cinco estudios revisados se comparan métodos ventilatorios con los de frecuencia cardiaca ^[5, 2, 11, 15, 26]. Todos tienen resultados positivos, indicando que es posible utilizar la FC y su punto de inflexión para calcular el umbral anaeróbico. Las muestras que aparecen son muy variadas y se trabaja con niños ^[2, 5], adultos ^[11, 15] e incluso deportistas de élite ^[26]. De estos, cuatro ^[5, 11, 15, 26] muestran correlaciones muy altas ($r=0.82 - 0.94$). El test de Debray (2007) ^[5] se realizó con niños y se vio que el punto de inflexión de la FC era un buen predictor del VT en la mayoría de sujetos (76.5%) pero no en todos. Es por ello que se deberían realizar más estudios con este tipo de poblaciones pues muestran una respuesta distinta a los adultos en estos trabajos.

En el estudio de Bergstrom et al. ^[1] se muestra una correlación de $r=0.91$ entre potencia crítica (3' all-out test) y el punto de compensación respiratoria (observando la relación entre la ventilación y el VCO_2). Concluyen que no hubo diferencias significativas entre la potencia crítica calculada en el test de 3' y la potencia asociada con el punto de compensación respiratoria. Este punto de compensación respiratoria no es exactamente el Uan, sino que se encuentra una vez superado éste. Aun así este test de 3 minutos para calcular la potencia crítica es de gran interés como los métodos de FC ya que, además de no ser invasivo y excesivamente caro, es muy fácil y rápido de aplicar.

Otro método a destacar es el empleado por Rodríguez-Mayorro et al. ^[19], el talk test. Éste tuvo una alta correlación con el umbral ventilatorio calculado mediante los equivalentes ventilatorios ($r=0.94$). El estudio se llevó a cabo para buscar una forma no invasiva y económica de evaluar el rendimiento deportivo. El test demostró ser válido, pero la muestra con la que se realizó el estudio era muy pequeña ($N=18$) y muy específica ya que se trataba de ciclistas de élite. Por tanto se debería estudiar este método más a fondo en el futuro con una muestra más amplia y con un sector menos específico de la población. Además sería interesante que se realizara sobre un tapiz rodante para observar cómo varían los resultados y si es posible utilizar este método aplicado al atletismo de fondo.

Por último es preciso mencionar los distintos factores que pueden afectar a los resultados de las mediciones de los estudios ya que pueden alterar la concentración de lactato. Estos factores se deberían tener en cuenta antes de realizar un estudio pues pueden modificar el umbral anaeróbico. Algunos de estos factores son la edad (Beneke et al. 2001) ^[14], tipos de fibra muscular predominante (Ivy et al. 1980) ^[14], estado de forma de los sujetos (Saltin et al.

1970) ^[14], tipo de protocolo (Jacobs et al. 1986) ^[14], y factores ambientales como la temperatura demasiado baja (Bergh y Ekblom, 1979) ^[14] y la altitud (Brooks et al. 1991) ^[14].

Propuesta de aplicación práctica

El objetivo de esta revisión era descubrir qué método o métodos para calcular el umbral anaeróbico eran más idóneos para aplicar al atletismo de fondo teniendo en cuenta factores de validez, fiabilidad, economía y de accesibilidad. En esta revisión se ha visto que los métodos más válidos y fiables son los que se basan en la toma de muestras de lactato en sangre, pero son invasivos y requieren de material y personal especializado. También se ha demostrado la validez de los métodos ventilatorios pero, a pesar de no ser invasivos, siguen requiriendo material específico y costoso para realizar el análisis gaseoso. Por otra parte encontramos los métodos aplicados a frecuencia cardiaca que como se ha visto, también presenta una buena correlación con los otros métodos y además tienen la ventaja de no ser invasivos ni de necesitar material demasiado costoso. Dentro de este grupo más económico podemos incluir los métodos de potencia crítica, RPE y el test del habla.

A la hora de elegir entre estos métodos para aplicar al atletismo de fondo debemos diferenciar entre poblaciones. En deportistas de élite, con un buen equipo técnico detrás, que no les suponga un coste excesivo y les sea de crucial importancia a la hora de evaluar su rendimiento para plantear distintas intensidades en sus entrenamientos, se recomendarían los métodos de lactato o ventilatorios. La ventaja de los ventilatorios respecto a los de lactato reside en que no son invasivos y no es necesario realizar varios tests. Esto es así porque se consideran los más válidos y fiables, y si el factor económico no supone un problema sería la mejor opción para el cálculo del umbral anaeróbico. Ahora bien, para el resto la población adulta, sería interesante calcular el Uan mediante la frecuencia cardiaca y utilizando la percepción subjetiva del esfuerzo como complemento. Lo ideal pues, tras ver los resultados de los distintos estudios sería realizar un protocolo como el de Sentinja et al. ^[22], que emplea el método de Conconi ^[10] modificado. Es importante decir que también se podría aplicar en esta población el test de 3' de potencia crítica. Este método plantea la ventaja del ahorro de tiempo. No obstante, existen menos estudios al respecto y con muestras muy pequeñas (N=10-28), por eso nos decantamos más por los métodos de FC y complementados con RPE. Por otra parte, no se puede hacer esta afirmación para todas las edades ya que, como se vio en el estudio de Debray et al. ^[5], estos métodos no fueron válidos para el 23.5% de los niños estudiados. Se debería realizar más estudios con sujetos de estas poblaciones, para poder afirmar un tipo de método óptimo para calcular el umbral anaeróbico sin necesidad de que sea invasivo o excesivamente costoso.

Bibliografía

- 1 Bergtrom, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Traylor, D. A., Camic, C. L., Lewis, R. W., Schmidt, R. J., y Johnson, G. O. (2013). The relationships among critical power determined from a 3-min all-out test, respiratory compensation point, gas exchange threshold, and ventilatory threshold. *Research quarterly for exercise and sport*, 84, 232-8.

- 2 Buchheit, M., Solano, R., y Millet, G. P. (2007). Heart-rate deflection point and the second heart-rate variability threshold during running exercise in trained boys. *Pediatr Exerc Sci*, 19(2), 192-204.
- 3 Burkhalter, N. (1996). Evaluación de la escala Borg de esfuerzo percibido aplicada a la rehabilitación cardiaca. *Revista latinoamericana de enfermagen*, 4(3), 65-73.
- 4 Costa-Sotelo, R., Najara-Carvalho, V., Madrid, B., Magalhães-Sales, M., Rodrigues-Moreira, M., y Gustavo-Simões, H. (2011). Lactate minimum identification in youth runners through a track test of three incremental stages. *Revista brasileira medicina esporte*, 17(2), 119-22.
- 5 Debray, P., y Dey, S. K. (2007) A comparison of the point of deflection from linearity of heart rate and the ventilatory threshold in the determination of the anaerobic threshold in Indian boys. *J Physiol Anthropol*, 26(1), 31-7.
- 6 Fabre, N., Mourot, L., Zerbini, L., Pellegrini, B., Bortolan, L., y Schena, F. (2013). A novel approach for lactate threshold assessment based on rating of perceived exertion. *Int J Sports Physiol Perform*, 8(3), 263-70.
- 7 Gamelin, F. X., Coquart, J. M., Ferrari, N., Vodougnon, H., Matran, R., Leger, L., y Bosquet, L. (2006). Prediction of one-hour running performance using constant duration tests. *J Strength Cond Res*, 20(4), 735-9.
- 8 García-Verdugo, M. (2007). Resistencia y entrenamiento, una metodología práctica. Santiago de Compostela, España: Editorial Paidotribo.
- 9 Higa, M. N., Silva, E., Neves, V. F. C., Catai, A. M., Gallo, L., y Silva de Sá, M. F. (2007). Comparison of anaerobic threshold determined by visual and mathematical methods in healthy women. *Brazilian journal of medical biological research*, 40, 501-8.
- 10 Ignjatovic, A., Hofmann, P., y Radovanovic, D. (2008). Non-invasive determination of the anaerobic threshold based on the heart deflection point. *Physical Education and sport*, 6(1), 1-10.
- 11 Karapetian, G. K., Engels, H. J., y Gretebeck, R. J. (2008). Use of heart rate variability to estimate LT and VT. *Int J Sports Med*, 29(8), 652-7.
- 12 Keir, D. A., Fontana, F. Y., Robertson, T. C., Murias, J. M., Paterson, D. H., Kowalchuk, J. M. y Pogliaghi, S. (2014). Exercise intensity thresholds: identifying the boundaries of sustainable performance. *Medicine & science in sports & exercise*.
- 13 Lopes-Motoyama, Y., Assis-Pereira, P. E., Jesús-Esteves, G., Pereira-Duarte, J. M., Puibelli-Carrara, V. C., Mello-Risato, G. y Silva-Marques, P. H. (2013). Alternative methods for estimating maximum lactate steady state velocity in physically active young adults. *Revista brasileira de cineantropometria e desempenho humano*, 16(4), 419-26.
- 14 López-Chicharro, J., Aznar-Laín, S., Fernández-Vaquero, A., López-Mojares, L. M., Lucía-Mulas, A., y Pérez-Ruiz M. (2004). Transición aeróbico-anaeróbica: Concepto, metodología de determinación y aplicaciones. Madrid, España: Master Line.

- 15 Mielke, M., Housh, T. J., Hendrix, C. R., Zuniga, J., Camic, C. L., Schmidt, R. J., y Johnson, G. O. (2011). A test for determining critical heart rate using the critical power model. *J Strength Cond Res*, 25(2), 504-10.
- 16 Nikoöie, R., Gharakhanlo, R., Rajabi, H., Bahraminegad, M., y Ghafari, A. (2009). Noninvasive determination of anaerobic threshold by monitoring the %SpO₂ changes and respiratory gas exchange. *J Strength Cond Res*, 23(7), 2107-13.
- 17 Okuno, N. M., Perandini, L. A., Bishop, D., Simões, H. G., Pereira, G., Berthoin, S., Kokubun, E., y Nakamura, F. Y. (2011). Physiological and perceived exertion responses at intermittent critical power and intermittent maximal lactate steady state. *J Strength Cond Res*, 25(7), 2053-8.
- 18 Plato, P. A., McNulty, M., Crunk, S. M., y Tug Ergun, A. (2008). Predicting lactate threshold using ventilatory threshold. *Int J Sports Med*, 29(9), 732-7.
- 19 Rodríguez-Mayorro, J. A., Villa, J. G., García-López, J., y Foster, C. (2013). Relationship between the talk test and ventilatory thresholds in well-trained cyclists. *Journal of strength and conditioning research*, 27(7), 1942-9.
- 20 Santos-Concejero, J., Granados, C., Irazusta, J., Bidaurrezaga-Letona, I., Zabala-Lili, J., Tam, N., y Gil, S. M. (2014). OBLA is a better predictor of performance than Dmax in long and middle-distance well-trained runners. *J Sports Med Phys Fitness*, 54(5), 553-8.
- 21 Scherr, J., Wolfarth, B., Christle, J. W., Pressler, A., Wagenpfeil, S., y Halle, M. (2013). Associations between Borg's rating of perceived exertion and physiological measures of exercise intensity. *Eur J Appl Physiol*, 113(1), 147-55.
- 22 Sentija, D., Vucetic, V., y Markovic, G. (2007). Validity of the modified Conconi running test. *Int J Sports Med*, 28(12), 1006-11.
- 23 Solberg, G., Robstad, B., Skjonsberg, O. H., y Borchsenius, F. (2005). Respiratory gas exchange indices for estimating the anaerobic threshold. *Journal of sports science and medicine*, 4, 29-36.
- 24 Souza, K. M., Gross, T., Babel-Junior, R., Lucas, R. D., Pereira-Costa, V., y Antonacci-Guglielmon, L. G. (2012). Maximal lactate steady state estimated by different methods of anaerobic threshold. *Rev Bras Cineantropom Desempenho Hum*, 14(3), 264-75.
- 25 Viera-Browne, R. A., Magalhaes-Sales, M., Costa-Sotelo, R., Yukio-Asano, R., Vilanova-Moraes, J. F., França-Barros, J., Grubert-Campbell, C. S., y Gustavo-Simoes, H. (2015). Critical velocity estimates lactate minimum velocity in youth runners. *Motriz: The journal of physical educatio*, 21(1), 1-7.
- 26 Vucetić, V., Sentija, D., Sporis, G., Trajković, N., y Milanović, Z. (2014). Comparison of ventilation threshold and heart rate deflection point in fast and standard treadmill test protocols. *Acta Clin Croat*, 53(2), 190-203.