



universidad
de león

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER EN INNOVACIÓN E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS DE LA
ACTIVIDAD FÍSICA Y EL DEPORTE

Curso académico 2015/2016

**VALIDEZ Y REPRODUCTIBILIDAD DE UNA NUEVA METODOLOGÍA PARA
CALCULAR EL DÉFICIT MÁXIMO DE OXÍGENO ACUMULADO EN ATLETAS**

Validity and Reproducibility of a New Method to Calculate the Maximum
Accumulated Oxygen Deficit in Athletes

Autor: Alvaro Gil Alonso

Tutor: José A. Rodríguez Marroyo

Fecha: 10/09/2016

VºBº TUTOR:

VºBº AUTOR:

ÍNDICE

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Objetivos	12
Metodología	13
Sujetos	13
Diseño experimental	13
Test incremental máximo	14
Pruebas submáximas	14
Test supramáximo	15
Análisis estadístico	15
Resultados	16
Discusión	24
Conclusiones	26
Bibliografía	27

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue analizar la validez y fiabilidad de la valoración del déficit máximo acumulado de oxígeno usando un test incremental. En el estudio participaron 28 sujetos (media \pm SD; edad, 21.8 \pm 2.5 años; peso, 71.0 \pm 10.6 kg y altura, 175.2 \pm 8.1 cm). Todos ellos realizaron dos pruebas incrementales en tapiz rodante, 7 pruebas submáximas de 5 min de duración entre el 30 y el 90% del VO_{2max} y un test supramáximo al 105% de la velocidad máxima alcanzada en el primer test incremental realizado. Todas las pruebas fueron realizadas en la misma semana y con al menos 24 h de recuperación entre ellas. El déficit máximo acumulado de oxígeno fue calculado en la prueba supramáxima utilizando diversas aproximaciones para calcular la relación VO₂-velocidad y en el test incremental. Los menores déficits se analizaron en el test supramáximo (54.8-80.0 ml·kg⁻¹) vs. a los analizados en el test incremental (61.9-93.2 ml·kg⁻¹). Se analizaron coeficientes de variación muy altos entre los déficits calculados en las dos pruebas incrementales (35.9-55.9%). La utilización de un test incremental para la estimación del déficit máximo acumulado de oxígeno en atletas no es un método válido ni fiable.

Palabras clave: Valoración, Capacidad Anaeróbica, Déficit de Oxígeno.

ABSTRACT

The aim of this study was to analyze the validity and reliability of the assessment of maximum accumulated oxygen deficit using an incremental test. The study involved 28 subjects (mean±SD; age, 21.8±2.5 years; weight, 71.0±10.6 kg and height, 175.2±8.1 cm). They performed two incremental treadmill tests, 7 submaximal tests lasting 5 min, between 30 and 90% of VO₂max and supramaximal test 105% of the maximum speed reached in the first incremental test. All tests were conducted in the same week and at least 24 hours of recovery between them. The maximum accumulated oxygen deficit was estimated at supramaximal test using different approaches to calculate the VO₂-speed ratio and the incremental test. The smaller deficits were analyzed in the supramaximal test (54.8-80.0 ml·kg⁻¹) vs. to those discussed in the incremental test (61.9-93.2 ml·kg⁻¹). Very high coefficients of variation were analyzed between deficits calculated in the two incremental tests performed (35.9-55.9%). Using an incremental test for estimating the maximum accumulated oxygen deficit in athletes is not a valid and reliable method.

Keywords: Assessment, Anaerobic Capacity, Oxygen Deficit.

INTRODUCCIÓN

Importancia del metabolismo anaeróbico

A la hora de realizar ejercicio debemos tener en cuenta que utilizaremos ambas vías metabólicas, aeróbica y anaeróbica, cierto que en mayor o en menor medida, dependiendo de la actividad física o deporte que estemos realizando, su volumen e intensidad. Para (Nummela, Hämäläinen, & Rusko, 2007), es importante esta vía anaeróbica pero debemos tener en cuenta que más allá de los 25 segundos para las mujeres y 22 segundos para los hombres el componente aeróbico comienza a hacerse más visible, siendo hasta ese momento predominante el metabolismo anaeróbico, pero sin excluir nunca el aeróbico.

La energía que requieren las contracciones musculares procede de la división de adenosin-trifosfato (ATP). En el metabolismo aeróbico y anaeróbico es necesario este proceso, por el cual se utiliza este ATP en forma de energía y se debe re-sintetizar si el ejercicio es prolongado. En el caso de ser sub-máximo intervendría más el metabolismo aeróbico, pero si el ejercicio es de alta intensidad por esta vía metabólica no sería suficiente para conseguir la energía tan rápido como es necesario, por lo que requiere de una producción cuantitativa de energía por la vía anaeróbica (Gastin, 1994), (Noordhof, Vink, de Koning & Foster, 2011) y (Noordhof, de Koning & Foster, 2010). De hecho se ha asumido que sujetos que tienen una mayor capacidad anaeróbica tienen un mayor rendimiento. La mayoría de las acciones de extrema importancia en el deporte (saltar, lanzar, cambiar de ritmo, esprintar,...) se basan en un ejercicio exhaustivo, corto y/o de potencia que engloban mayoritariamente este metabolismo (Ravier, Dugue, Grappe & Rouillon, 2005), (Andrade, Zagatto, Kalva-Filho, Mendes, Gobatto, Campos & Papoti, 2015) y (Zagatto, Redkva, Loures, Kalva-Filho, Franco, Kaminagakura, & Papoti, 2011).

Según (Bertuzzi, Franchini, Ugrinowitsch, Kokubun, Lima-Silva, Pires, Nakamura, & Kiss, 2010) es un factor determinante para deportes exhaustivos y de corta duración, como las carreras de 200 y 400 metros.

Valoración del metabolismo anaeróbico

Como muestra (Gastin, 1994), el sistema anaeróbico está limitado por la cantidad de energía que se puede producir durante un ejercicio concreto. Los depósitos de ATP son limitados y por lo cual recurrimos a 3 procesos que actúan de manera conjunta para proporcionar la energía que requiere el músculo. El primero se trata de la división de creatin-fosfato (CP) que se encarga de controlar rápidamente la concentración de ATP y ADP en incrementos repentinos de demanda de energía en el inicio del ejercicio intenso; el segundo la ruptura de carbohidratos para liberar energía, principalmente la glucólisis anaeróbica que ocurre en el músculo. Durante el ejercicio máximo la velocidad de glucólisis se incrementa hasta 100 veces pero esta velocidad no se sostiene durante mucho tiempo.

La glucólisis puede ser limitada por la inhibición de las enzimas glucolíticas o la falta de activación de glucólisis. La primera posiblemente causada por el descenso de pH que reduce la

actividad de las enzimas glucolíticas y da una menor velocidad en la re-síntesis de ATP. La segunda causada por una reducción de la demanda de energía por la inhibición de las motoneuronas, cambios en la activación o la capacidad de generar fuerza de los puentes cruzados en cada contracción o la alteración de la capacidad del retículo sarcoplasmático para cargar y liberar Ca^{++} . Estos 2 procesos componen el sistema energético vía anaeróbica, capaz de regenerar grandes cantidades de ATP.. El tercero se trata del sistema aeróbico que es el primero capaz de sintetizar grandes cantidades de ATP a una velocidad más baja por la fosforilación oxidativa, donde la recuperación de PC liderada por la respiración mitocondrial, provee el soporte de la capacidad oxidativa y que ha demostrado ser independiente de la frecuencia de estimulación y de los niveles finales de PC al terminar el ejercicio (Haseler, Hogan & Richardson, 1999), así como también el sistema respiratorio y cardiovascular.

El descenso de la fuerza en ejercicios intensos y breves, es el resultado de la reducción de re-síntesis de ATP y del descenso de la velocidad de utilización de ATP que da lugar a fatiga. La excesiva concentración de ácido láctico y depleción de sustratos conlleva el cese del ejercicio o el descenso de la intensidad. El ácido láctico no por si solo causa fatiga pero si los cambios de pH que ello conlleva. No es posible una depleción total de ATP pero sí de los depósitos de CP durante ejercicios intensos entre 1-3 minutos. La depleción de CP y su importancia en el desarrollo de la fatiga hace pensar la importancia que desempeña a la hora de determinar la capacidad anaeróbica. (Gastin, 1994) y (Nummela, Hämmäläinen, & Rusko, 2007).

No hay estudios significativos que demuestren que el entrenamiento cambie el nivel de los depósitos en reposo de ATP y CP, pero sí que los entrenamientos de velocidad mejoran la capacidad de buffer, es decir amortiguación del aumento de los niveles de ácido láctico como consecuencia del ejercicio intenso, capacidad glucolítica, concentración de enzimas oxidativas, actividad ATPase de las miofibrillas y producción de lactato ("tolerancia" al ácido láctico), rapidez de re-utilización como fuente energética o su eliminación. No obstante con la dieta que puede existir un aumento con la toma de creatina en los depósitos de CP o una dieta rica en hidratos. Así como es improbable que una falta de glucógeno muscular afecte a ejercicios máximos o supra-máximos.

A mayor proporción de fibras tipo 2 o mayor área muscular que contenga fibras tipo 2 tendrá una mayor ventaja sobre el trabajo anaeróbico, menor de 10 segundos. Estudios recientes nos informan que tras el entrenamiento de velocidad podemos cambiar la distribución de nuestras fibras, incrementando fibras tipo 2 entre un 8-13% y disminuir las fibras de tipo 1 (36,38). (Gastin, 1994).

Valoración de la capacidad anaeróbica

La capacidad anaeróbica puede ser definida como la máxima cantidad de ATP que puede ser re-sintetizado por la división de fosfo-creatina y glucógeno intramuscular, (Bertuzzi, Franchini, Ugrinowitsch, Kokubun, Lima-Silva, Pires, Nakamura, & Kiss, 2010), en los procesos anaeróbicos durante un ejercicio de máxima intensidad. No acepta un método único, universal para su evaluación a diferencia de la capacidad aeróbica. (Gastin, 1994).

La capacidad anaeróbica máxima se alcanza según varios estudios entre los 20 y los 30 años y desde ahí va decreciendo un 6% cada 10 años. Los niveles que se pueden llegar a alcanzar no solo dependen de la maduración, sino también de la genética, características antropométricas y del entrenamiento. (Gastin, 1994) Escribe en su revisión que debemos tener en cuenta el sexo, pues también encontramos diferencias a la hora de obtener el déficit máximo de oxígeno del 36% absoluto y 17% relativo más bajos que en hombres, que son explicables por la composición corporal (diferencia en la masa libre de grasa y el tamaño de la masa muscular), el tipo de fibras o el mayor número de fibras tipo II en hombres que en mujeres y que según (Medbo & Burgers, 1990) es más efectivo el entrenamiento de la capacidad anaeróbica en chicos que en chicas, pues hay una diferencia de mejora del 10% mayor en chicos respecto a las chicas. La capacidad anaeróbica láctica tiene un alto componente genético, alrededor del 69% de la respuesta de entrenamiento se ve afectada por la genética.

Evaluación ergométrica de la capacidad anaeróbica

Debemos diferenciar potencia de capacidad. La primera es la cantidad máxima de energía que puede ser reutilizada durante el ejercicio, por unidad de tiempo y la segunda es la cantidad total de energía disponible. Una vez conocido el punto de partida se realizaron test para determinar la potencia y capacidad aláctica y láctica. Estos sistemas metabólicos anaeróbicos son a veces difíciles de analizar porque siempre hay una contribución aeróbica, incluso en esfuerzos cortos e intensos de 30 segundos (aproximadamente 28-40%), Por lo que tenemos que tener muy en cuenta el tiempo del test para desechar el componente lento en su máxima medida. (Gastin, 1994).

Podemos dividir los test que vamos a realizar para estimar la capacidad anaeróbica en pruebas "all out" y pruebas de intensidad constante y/o progresiva hasta la extenuación.

Los indicadores utilizados para estimar la capacidad anaeróbica son pico de potencia, tiempo en alcanzar la potencia máxima, fatiga, trabajo total y tiempo en llegar al agotamiento.

Estos test pueden ser de fuerza-velocidad, test de salto vertical, tests del escalón y test en diferentes ergómetros (wingate, MAOD,...) y 2 nuevas pruebas, el test de carrera anaeróbica máxima (MART), siguiendo un patrón muy parecido al del MAOD para calcular la capacidad anaeróbica, donde la potencia hasta el agotamiento es expresada como demanda de oxígeno, la cual se define como la capacidad de trabajo anaeróbica de un sujeto (Nummela, Alberts, Rijntjes, Luthanen, & Rusko, 1996) y (Zagatto, Redkva, Loures, Kalva-Filho, Franco, Kaminagakura, & Papoti, 2011) y el test sprint en carrera anaeróbica (RAST), (Andrade, Zagatto, Kalva-Filho, Mendes, Gobatto, Campos & Papoti, 2015), ambos métodos comparados para ser validados con el MAOD. Según Medbo, Mohn, Tabata, Bahr, & cols. (1988) el déficit máximo de oxígeno alcanzado en ejercicios de alta intensidad hasta el agotamiento debe englobar esfuerzo de entre 2-3 minutos. Para su evaluación durante el test se tiene que provocar una demanda de O_2 mayor que la captación real de O_2 (VO_{2max}). En la literatura que se describe en (Gastin, 1994) los test supra-máximos deberían de durar entre 1-2 minutos o menos y a mayor pendiente mayor déficit acumulado de oxígeno.

Los test realizados en cicloergómetro se pararán cuando el sujeto no sea capaz de mantener una frecuencia de pedaleo marcada en torno a 70-90 revoluciones por minuto y para tapiz rodante

el hecho de incapacitarte seguir corriendo a una determinada velocidad indicaría el final de la prueba.

Existe una relación que estima la capacidad anaeróbica, siendo el trabajo realizado igual a un almacenamiento de energía anaeróbica, más la potencia crítica multiplicada por el tiempo en el que el sujeto ya no puede más ($W_{lim}=a+bT_{lim}$). Se demostró que en condiciones de hipoxia la variable de la potencia crítica disminuía, sin embargo la que correspondía a la vía anaeróbica no se veía afectada, lo que nos quiere decir que el almacenamiento de energía anaeróbica es independiente del proceso aeróbico. Hay pocas referencias que apoyen que “a” en la ecuación anterior pueda ser considerado como capacidad anaeróbica, pero puede ser comparada con otras formas de estimar la capacidad anaeróbica. El método del déficit acumulado de oxígeno (AOD) tiene una mayor correlación que el método $W_{lim}-T_{lim}$. Vandewalle intento validar la interceptación de “a” como capacidad anaeróbica sin éxito, posiblemente debido a que la energía suministra desde los componentes anaeróbicos hasta el agotamiento es independiente del tiempo, lo que sugiere que a mayor duración, mayor liberación de lactato e hidrogeniones hacia el musculo activo y por ello mayor potencial para liberar energía anaeróbica. Entonces cuestionó los test all-out y de intensidad constante en ergómetro para estimar la capacidad anaeróbica y se encontró que gran parte del rendimiento de estos tests puede ser debido a diferentes factores como, “incrementar producción de ácido láctico, incrementar almacenes de CP, aumentar capacidad de buffer de músculo y sangre, aumentar eflujo de lactato e hidrogeniones durante el ejercicio, una mejora del consumo de oxígeno medio y máximo, un aumento en la concentración de mioglobina, una mejora del mecanismo eficiente y factores motivacionales, aunque de estos solo los 3 primeros parecen relacionarse con los procesos anaeróbicos”. (Gastin, 1994). Los test deben de ser lo suficientemente largos para que el sujeto llegue al agotamiento, no obstante nos encontramos con un problema que a mayor tiempo mayor intervención del sistema aeróbico y este difiere según el tipo de individuo y entrenamiento, pues si realiza un entrenamiento de resistencia el componente aeróbico tendrá mayor presencia que en los de velocidad a pesar de que el trabajo total realizado sea el mismo. (Gastin, 1994).

Test para valorar la capacidad anaeróbica

No existe un método universal para medir la capacidad anaeróbica, pues no existe ningún método directo eficaz para calcularla y por tanto se debe estimar su resultado.

Metabolitos musculares

Se trata de realizar una biopsia muscular y determinar cambios relativos en las concentraciones de ATP, CP y lactato y estimar la capacidad anaeróbica a través de la masa muscular activa después del ejercicio de corta duración y de alta intensidad. Problema, que hay un largo tiempo desde que se acaba el ejercicio hasta que se recoge y analiza la muestra y ocurren procesos como la re-síntesis de ATP que alterarían los resultados. Aun así es un método directo que aunque no sea del todo preciso, nos servirá para validar los demás métodos indirectos. (Gastin, 1994)

Lactato en sangre

La concentración del lactato después del ejercicio intenso es un indicador cualitativo del metabolismo anaeróbico, ya que el lactato en sangre no indica con evidencia la producción de lactato y no nos informa de la energía liberada por los almacenes de fosfógenos, ATP y CP. Su pico máximo de concentración lo encontraremos aproximadamente a los 5 minutos al terminar el ejercicio y esto quiere decir que no existe equilibrio entre la concentración de lactato en sangre y músculo. La concentración en sangre es más baja que en el músculo. El lactato aumenta a la vez que aumenta la intensidad del ejercicio. La concentración de lactato se limpia según el nivel de entrenamiento y la velocidad de metabolizar y/o eliminar el ácido láctico, por ello no resulta muy fiable su análisis y posterior comparación y estimación de la capacidad anaeróbica a partir de este método. (Gastin, 1994)

Deuda de oxígeno

Nos referimos con deuda de oxígeno a la cantidad en exceso de oxígeno consumido en la recuperación tras finalizar el ejercicio. Según la hipótesis que planteó Hill et al. El volumen de oxígeno consumido después del ejercicio guardaba relación con el lactato durante la fase de recuperación al finalizar el ejercicio. Margaria et al. Modificaron esta hipótesis contando con el componente rápido "aláctico" al inicio del ejercicio relacionado con el reemplazamiento de fosfógenos en el músculo esquelético y el componente lento "láctico", relacionado con la resíntesis de glucógeno durante la recuperación. A consecuencia de esta hipótesis la deuda de oxígeno ha sido utilizada como método para predecir la capacidad anaeróbica, aunque debemos de tener en cuenta la intensidad y duración del ejercicio, que incrementa con el entrenamiento y que es mayor en atletas que entrenan velocidad. Su mayor crítica es la débil relación entre consumo de oxígeno durante la recuperación y la acumulación y destino del lactato y los múltiples factores que potencian la respiración mitocondrial tras el ejercicio. La mayor parte del lactato producido se reutiliza como sustrato en la oxidación, con lo que se desmonta el concepto de "consumo extra de oxígeno" y la teoría de tener que llenar los depósitos anaeróbicos después del ejercicio. Grassler y Brooks cambiaron los términos "deuda aláctica" y "deuda láctica" que creían inapropiados por "exceso de consumo de oxígeno post-ejercicio (EPOC)" y "recuperación de oxígeno", (Gastin, 1994), lo que utilizan (Bertuzzi, Franchini, Ugrinowitsch, Kokubun, Lima-Silva, Pires, Nakamura, & Kiss, 2010), junto a la concentración de lactato, como método para estimar la capacidad anaeróbica.

Para estimar la capacidad anaeróbica a través de la deuda de oxígeno debemos utilizar el consumo de oxígeno durante la recuperación como energía anaeróbica y ello está aún cuestionado por el destino que toma el ácido láctico. La deuda de oxígeno es generalmente mayor que el déficit de oxígeno, lo que sugiere que el método está limitado en su uso y encontramos en muchos de los estudios un coeficiente de correlación test-retest muy bajo para la deuda máxima de oxígeno. (Gastin, 1994)

Déficit máximo acumulado de oxígeno (MAOD)

Lo primero decir que el concepto de déficit de O₂ fue introducido por Krogh y Lindhard en 1919-1920 y el MAOD no fue utilizado como medida de capacidad anaeróbica hasta pasados los años

60 por (Ericksson et al., 1973; Hermansen, 1976; Karlsson & Saltin, 1970) registrado en (Hill, 1996). Hasta hoy que es el método más utilizado para determinar de una forma cuantitativa la capacidad anaeróbica, que se define como la cantidad máxima de ATP que se puede resintetizar por el metabolismo anaeróbico (principalmente la fosfocreatina), además de la diferencia de la energía que aporta el sistema aeróbico o el oxígeno consumido durante el ejercicio y el total de la demanda energética, (Gastin, 1994; Bergstrom, Housh, Zuniga, Camic & cols., 2012; Noordhof, Vink, de Koning & Foster, 2011; Minahan, Chia & Inbar, 2007; Clare & Donald, 2000; Medbo & Burgers, 1990 y Medbo, Mhon, Tabata & cols., 1988). MAOD, medido durante el ejercicio exhaustivo de corta duración se ha planteado para estimar la cantidad máxima de energía que se puede obtener a partir del metabolismo anaeróbico (Medbo & Burgers, 1990; Medbo, Mhon, Tabata & cols., 1988; (Hill & Vingren, 2011). Usar esta metodología como una medida de liberación de energía durante el ejercicio anaeróbico debe cumplir lo siguiente (Medbo & Burgers, 1990): 1- la liberación de energía en forma de la resíntesis de ATP puede ser utilizada en ejercicios aeróbicos (quienes dominan la regeneración de ATP) y anaeróbicos, de tal forma que la parte aeróbica es el VO_2 medido en la prueba y la parte anaeróbica es la liberación total de energía menos la parte aeróbica, 2- en ejercicios de intensidades moderadas a penas se puede ver el componente anaeróbico, puesto que el VO_2 aumenta de manera lineal, entonces al contar con una escasa contribución anaeróbica, el VO_2 medido refleja la demanda de O_2 , y de este modo esta demanda aumenta linealmente por la intensidad progresiva del ejercicio; llevada esta relación a cabo puede ser extrapolada a ejercicios supramáximos donde prime el componente anaeróbico y así obtener una demanda para cada sujeto, ya que originalmente, era estimada asumiendo una eficiencia común para todos los individuos (Hill, Ferguson, & Ehler, 1998; Dorado, Chavarren, & López, 1997 y Medbo, Mhon, Tabata & cols., 1988), pero si el ejercicio es anaeróbico y está por encima del umbral anaeróbico, la demanda y el consumo de oxígeno no serían similares, y dejaría de ser una relación lineal, por ello métodos que utilicen esta relación lineal estarán infra-estimando el MAOD. (Hill & Vegin, 2011); 3- durante una intensidad constante la regeneración de ATP es constante, aunque sea un ejercicio llevado hasta el agotamiento; 4- el déficit máximo de oxígeno acumulado puede encontrarse en cualquier momento del ejercicio integrando hasta el déficit de O_2 .

Teniendo en cuenta que sus posibles limitantes son los almacenes de CP y la concentración de lactato, Medbo et al. Perfeccionaron dicha técnica y ha sido el punto de partida para numerosas investigaciones buscando un MAOD_{alternativo}.

Su validez para cuantificar la energía desarrollada por el metabolismo anaeróbico se basa prácticamente en la medida de la producción de energía anaeróbica estimada a través de metabolitos en músculo y sangre (Pouilly & Busso, 2008).

El test de MEDBO para determinar el déficit máximo acumulado de oxígeno

Atendiendo al protocolo original para determinar el déficit máximo de oxígeno es necesaria la realización de las siguientes pruebas de valoración:

Prueba incremental máxima: en el protocolo original de Medbo la carga de inicio era 100 W y se incrementaba en 25 W cada 30 segundos (Medbo, Mhon, Tabata & cols., 1988). Este protocolo fue modificado por Gardner, Osborne, & cols. (2003) realizando escalones de 3 minutos, los

cuales siguen siendo los más recurrentes en cicloergómetro. Utilizando el tapiz como ergómetro han surgido diversos protocolos. La velocidad inicial ha estado en función de las características de los sujetos, aunque los aumentos más usados han sido incrementos de $1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (Hill, Ferguson & Ehler, 1998). En algunos casos la velocidad se ha mantenido constante y cada 2 minutos se ha aumentado en un 3% la pendiente (Scott, Roby, Lohman & Bunt, 1991).

Cálculo de la recta de economía: durante el ejercicio submáximo se produce un estado estable aeróbico que se alcanza aproximadamente al tercer minuto, este VO_2 representa la energía demandada por el ejercicio. La demanda energética será calculada presuntamente desde una eficiencia mecánica o economía de carrera constante que según la literatura se encuentra en torno al 16-25%, aunque Medbo et al. Consideran que si utilizamos un 22,5% puede ser demasiado bajo y tanto la demanda como el MAOD estén sobreestimados. Existen varios problemas al utilizar la eficiencia mecánica, el no ponerse de acuerdo en la literatura con el valor a utilizar y la poca diferencia inter-sujetos. Entonces Medbo propuso una línea de regresión de trabajo sub-máximo, realizando diversas series de ejercicios sub-máximos para establecer la relación entre el VO_2 y la producción de energía en diferentes intensidades, y consumo de oxígeno estable y su posterior extrapolación al trabajo supra-máximo. Esta línea de regresión sería similar al cálculo de la eficiencia Delta, ya que ambos reflejan cada incremento adicional en el trabajo. Después de obtener esta línea de regresión debemos sacar la media y la pendiente individual de cada recta para calcular el coste de oxígeno teórico y para acabar mantener la intersección “y” común y utilizar 2 medidas del consumo de oxígeno para calcular la demanda energética total. Medbo et al. propusieron 10 minutos de estado estable, sobre 20 intensidades sub-máximas entre el 35-100% $\text{VO}_{2\text{max}}$. Poole et al. Demostraron que el estado estable no se conseguía más allá del 79% $\text{VO}_{2\text{max}}$ en este caso para varones sanos, en todo caso no más allá de la potencia crítica, ya que fue el límite superior donde se puede ver una estabilidad en el consumo de oxígeno, lactato y pH en sangre, también Medbo y Tabata observaron una eficiencia constante para la potencia entorno a un rango entre 30-90% de $\text{VO}_{2\text{max}}$. Olesen uso 6 minutos de 5-6 intensidades sub-máximas con periodos de recuperación entre 3-7,5 minutos. Graham & McLellan hicieron 2 pruebas separadas en cicloergómetro con 3 intensidades sub-máximas cada una de 4 minutos. Bangsbo experimento una diferencia del 21% a la hora de estimar la demanda energética con las mismas cargas sub-máximas pero cambiando su duración 4-6 y 8-10 minutos, (Gastin, 1994). Según Medbo y cols. (Medbo & Burgers, 1990; Medbo, Mhon, Tabata & cols., 1988) la recta de economía se debe hallar usando entre 8-10 estadios de 10 min de esfuerzo. Buck y McNaughton llegaron a la conclusión que esta duración era la mínima, ya que sino el déficit de oxígeno calculado era demasiado bajo, asimismo Maxwell y Nimimo recomiendan estadios de 8-10 minutos (Noordhof, Koning & Foster, 2010). Sin embargo, otros autores ha determinado que el uso de escalones de 3 minutos de duración son suficientes para alcanzar un estado estable (Noordhof, Koning & Foster, 2010). Las intensidad propuestas para el cálculo de la recta de economía se sitúan entre el 35-90% del $\text{VO}_{2\text{max}}$. Cuanto mayor sea la intensidad utilizada en los estadios mayor será el déficit de oxígeno calculado (Noordhof, Vink, de Koning & Foster, 2011 y Noordhof, Koning & Foster, 2010). La recuperación entre los estadios puede ser de unos 20 minutos (Noordhof, Vink, de Koning & Foster, 2011). La relación de las anteriores variables para el cálculo de la recta de economía hace que el protocolo utilizado pueda ser demasiado extenso. Por ello, diferentes estrategias como disminuir el tiempo de los escalones hasta los 6 minutos, utilizar entre 2-4 escalones han sido planteadas

(Noordhof, de Koning & Foster, 2010). Roberts, Clark, Townsend, Anderson & cols. (2002) en base a los protocolos anteriores utilizaron únicamente 3 intensidades de 6 minutos entre el 50-75%, con una recuperación de 2 minutos entre cada medición. Otro protocolo que engloba poca duración es el planteado por Mezzani, Corrà, Sassi, Colombo & cols. (2006), donde utilizan 3 intensidades al 30-60-90% del máximo con 10 minutos de esfuerzo por cada intensidad. Medbo, Mohn, Tabata, Bahr, & cols. (1988), Medbo & Burgers (1990) y Scott, Roby, Lohman & Bunt (1991) proponen utilizar protocolos con pendiente. La pendiente utilizada por estos autores es de un 5.2-10.5%, dependiendo del nivel de cada sujeto. En definitiva utilizar un amplio rango de intensidades sub-máximas para calcular la recta de regresión disminuye los cambios progresivos y suaviza el cambio a intensidades supra-máximas de la eficiencia, disminuyendo la infraestimación de la demanda energética. (Gastin, 1994).

Prueba supra-máxima: se trata de una prueba hasta el agotamiento, donde se calcula el déficit de oxígeno acumulado con intensidades superiores al 100% y con ejercicios de tipo "all-out" isocinéticos. La duración de este tipo de pruebas hasta el agotamiento determinará la contribución de los sistemas energéticos aeróbico y anaeróbico, por lo tanto debe de ser lo suficientemente largo para permitir la liberación máxima de energía anaeróbica y no pasarse en el tiempo para que la vía aeróbica no exceda en su contribución. Medbo et al. proponen una duración en cinta de correr mayor de 2 minutos como ideal para alcanzar el MAOD pero no más de 3 minutos. Medbo y Tabata apoyan esta duración y añaden que se ve un leve aumento del MAOD si pasamos del primer minuto hasta el tercero. Apoyándonos en los estudios anteriores se llega a la conclusión que la duración ideal para determinar el MAOD en una prueba de intensidad constante hasta el agotamiento deberá de ser de entre 2-3 minutos. (Gastin, 1994).

Las intensidades van desde el 95-140% del VO_{2max} para evitar el componente lento del VO_2 . En tapiz las intensidades utilizadas son menos elevadas (95-110% del VO_{2max}) que en cicloergómetro, fundamentalmente, para evitar el riesgo que puede conllevar (Hill, Ferguson & Ehler, 1998). Por ello, se ha propuesto el aumento de la intensidad por medio de la pendiente (Hill, Ferguson & Ehler, 1998), aunque en la mayoría de los estudios como plantea (Andrade, Zagatto, Kalva-Filho, Mendes, Gobatto, Campos & Papoti, 2015) se utiliza una intensidad supra-máxima del 110% en tapiz rodante.

Por la duración excesiva que puede conllevar la realización del protocolo original, al tener que hacer la prueba incremental, hallar la recta de economía y por último realizar el test supra-máximo, distintos autores han propuesto no realizar la recta de economía (Gardner, Osborne, & cols., 2003 y Hill, Ferguson & Ehler, 1998). Estos autores hallan la relación VO_2 -intensidad utilizando los datos obtenidos en el test incremental, tanto cuando utilizan el cicloergómetro (Gardner, Osborne, & cols., 2003) como el tapiz rodante (Hill, Ferguson & Ehler, 1998). La intensidad que mejor se correlaciona ($r=0.89$) con el tiempo de agotamiento en cicloergómetro es del 120%.

No obstante se están abriendo nuevos puntos de investigación para estimar la capacidad anaeróbica de una manera mucho más eficiente a la propuesta por este $MAOD_{tradicional}$, a través de los $MAOD_{alternativos}$.

La determinación del déficit máximo acumulado de oxígeno en un test supramáximo

Como plantean (Bertuzzi, Franchini, Ugrinowitsch, Kokubun, Lima-Silva, Pires, Nakamura, & Kiss, 2010), a partir del componente rápido del consumo en exceso de oxígeno post-ejercicio ($EPOC_{fast}$), el cual corresponde a la energía usada para la resíntesis de los almacenes de fosfagenos de alta intensidad y la expresión del coste energético glucolítico que proponen di Pampero y Ferretti a través de la concentración de lactato en sangre por la cual se produce un equivalente de oxígeno. (Bertuzzi, Franchini, Ugrinowitsch, Kokubun, Lima-Silva, Pires, Nakamura, & Kiss, 2010), asumen que la suma de estos dos factores podría ser una alternativa para calcular el déficit máximo acumulado de oxígeno ($MAOD_{alternativo}$).

La determinación del déficit máximo acumulado de oxígeno en un test incremental

Esta metodología fue propuesta por Pouilly & Busso (2008) usando el pedaleo como modo de ejercicio. Para su estimación es necesaria la realización de un test progresivo hasta el agotamiento. Se basa en que durante la prueba se va acumulando un déficit de O_2 , el cálculo de este déficit por escalón se relaciona con el hallado durante un esfuerzo supra-máximo. La relación VO_2 -potencia se calcula utilizando los datos de la prueba incremental mediante una regresión lineal. Sin embargo, esta relación se ajusta utilizando un esfuerzo entorno al 50% del VO_{2max} . El déficit máximo acumulado de oxígeno se calcula a partir de la diferencia entre el consumo de oxígeno integrado durante todo el período de ejercicio y la predicción de la relación VO_2 -potencia hallada (Figura 1).

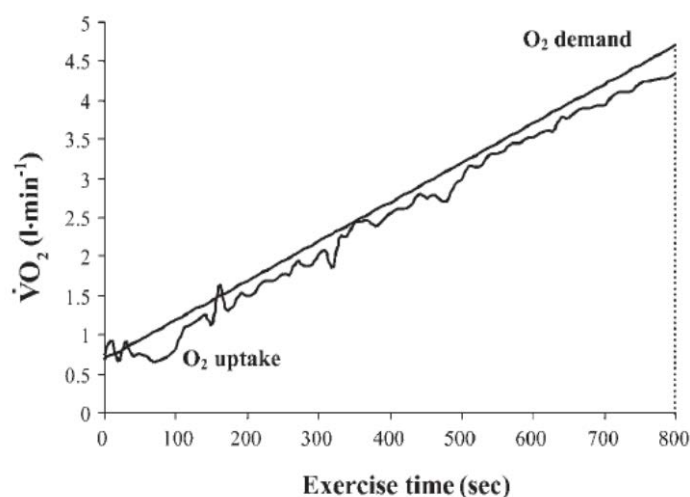


Figura 1. Representación esquemática del fundamento de la metodología propuesta por Pouilly & Busso (2008) para la estimación del déficit máximo acumulado de oxígeno durante la realización de un test incremental (tomado de Pouilly & Busso, 2008). La diferencia entre la demanda de O_2 estimada y el consumo real de O_2 de los sujetos estimaría el déficit de O_2 máximo.

OBJETIVOS

El objetivo general de este estudio fue estudiar la validez y reproductibilidad de la valoración del déficit máximo de oxígeno acumulado durante la realización de un test incremental máximo en atletas.

Como objetivos secundarios de este trabajo nos planteamos:

- Valorar la cualidad anaeróbica de los atletas atendiendo a la metodología propuesta por Medbo usando diferentes aproximaciones en el cálculo de la relación VO_2 -velocidad.
- Valorar el metabolismo aeróbico de los deportistas.
- Determinar la reproductibilidad de la capacidad y resistencia aeróbica de los deportistas.

METODOLOGÍA

Sujetos

En este estudio participaron veintiocho sujetos, dieciséis hombres (edad, 22.3 ± 2.4 años; peso, 74.4 ± 7.3 y altura, 177.8 ± 5.1) y once mujeres (edad, 19.0 ± 0.0 años; peso, 52.8 ± 4.0 y altura, 161.3 ± 6.8). Todos los sujetos que participaron en el estudio eran físicamente activos y practicaban actividad física o entrenaban de manera regular. Antes de iniciar el estudio los sujetos fueron informados del objetivo y de la metodología del mismo, obteniendo su participación voluntaria y su consentimiento por escrito.

Diseño Experimental

Todos los sujetos acudieron al laboratorio de Valoración de la Condición Física del Departamento de Educación Física y Deportiva en la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte en tres ocasiones dentro de la misma semana y con al menos 24 h de recuperación entre cada visita. Todos los sujetos realizaron dos test incrementales máximos con análisis de gases para valorar su cualidad aeróbica y el déficit máximo acumulado de oxígeno. La capacidad y resistencia aeróbica de los participantes se determinó valorando su VO_{2max} y sus umbrales ventilatorios, respectivamente. El déficit máximo acumulado de oxígeno se calculó atendiendo a la metodología propuesta por Pouilly & Busso (2008). Además, se realizaron varias pruebas sub-máximas entre el 30 y 90% del VO_{2max} para determinar la recta de economía de carrera de los sujetos y un test supra-máximo al 110% de la velocidad máxima para poder calcular el déficit máximo acumulado de oxígeno atendiendo a la metodología tradicional propuesta por Medbo, Mhon, Tabata & cols. (1988). El primer día de pruebas los sujetos realizaron un test incremental máximo y tras 30 min de recuperación corrieron 5 min a tres intensidades calculadas en función del VO_{2max} alcanzado en la prueba previa (30, 50 y 70% del VO_{2max}). El segundo día los sujetos corrieron a otras cuatro intensidades sub-máximas (40, 60, 80 y 90% del VO_{2max}) y realizaron un test supra-máximo (110% de la velocidad máxima) hasta el agotamiento después de 30 min de recuperación. El tercer día se repitió el test incremental máximo realizado el primer día para determinar la reproductibilidad de la valoración del déficit máximo acumulado de oxígeno a través del test incremental. El calentamiento (10 min de carrera entre $7-8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ más 5 min de estiramientos) y las condiciones del laboratorio ($\sim 21^\circ\text{C}$ y $\sim 30\%$ de humedad relativa) se estandarizaron para todos los sujetos. Así mismo, para evitar cualquier variación e influencia de los ciclos circadianos en los resultados, las sesiones de valoración se llevaron a cabo a la misma hora (Daniels, Scardina, Hayes & Foley, 1984; Morgan, Craib, Krahenbuhl & cols., 1994). Se recomendó a los sujetos realizar el día anterior a las pruebas un entrenamiento ligero y una dieta rica en hidratos de carbono.

Test incremental máximo

El test incremental se realizó sobre un tapiz rodante h/p/cosmos Pulsar (h/p/cosmos sports & medical gmbh, Nussdorf, Germany). El test se inició a una velocidad de $6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ y se incrementó en $1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ cada 1 min hasta que los sujetos no pudieron mantener la velocidad. La pendiente del tapiz fue fijada a un 1% durante toda la prueba para intentar imitar el coste metabólico que produce el viento cuando se corre al aire libre (Pugh, 1970). Durante toda la prueba se monitorizó la frecuencia cardíaca (FC) (Polar Vantage NV, Polar Electro Oy, Finland) cada 5 s y los gases respirados respiración a respiración (Medisoft Ergocard, Medisoft Group, Sorinnes, Belgium). Además, en los últimos 10 s de cada escalón los sujetos reportaron su percepción subjetiva del esfuerzo (RPE) utilizando la escala de Borg de 0-10 (Borg, 1982). Las variables analizadas en el test fueron la velocidad, FC máxima y el $\text{VO}_{2\text{max}}$. Se consideró como $\text{VO}_{2\text{max}}$ al valor máximo obtenido al promediar los datos cada 30 s (Fletcher, Esau, & Macintosh, 2009). Además, se determinaron los umbrales ventilatorios a tendiendo a la metodología descrita por (Davis, 1985). El criterio utilizado para determinar el umbral ventilatorio (VT) fue el incremento de la ventilación (VE), el equivalente ventilatorio del oxígeno ($\text{VE}\cdot\text{VO}_2^{-1}$) y de la presión end-tidal de oxígeno (PETO_2) sin el aumento concomitante del equivalente ventilatorio del dióxido de carbono ($\text{VE}\cdot\text{VCO}_2^{-1}$), y la segunda ruptura de la linealidad de la VE, el aumento del $\text{VE}\cdot\text{VO}_2^{-1}$ con un incremento paralelo del $\text{VE}\cdot\text{VCO}_2^{-1}$ y la disminución de la presión end-tidal del dióxido de carbono (PETCO_2) para hallar el umbral de compensación respiratoria (RCT).

El cálculo del déficit máximo acumulado de oxígeno durante el test incremental se realizó atendiendo a la metodología propuesta por Pouilly & Busso (2008). Los datos obtenidos en la prueba fueron analizados usando un análisis de regresión lineal para determinar la pendiente media de la relación VO_2 -velocidad. Una carga sub-máxima y estable al 50% de la velocidad máxima, determinada en el día 2 de pruebas, fue usada para ajustar la relación VO_2 -velocidad obtenida. Entonces, el punto de corte "y" de la relación fue computado usando el VO_2 durante las condiciones de estado estable de los últimos 2 min de los 5 min que los sujetos corrieron al 50% de la velocidad máxima. El déficit máximo acumulado fue computado restando el O_2 total consumido durante toda la prueba incremental de la demanda de O_2 predicha por la relación VO_2 -velocidad.

Pruebas submáximas

Para determinar la recta de economía de carrera los sujetos corrieron durante 5 min a siete intensidades sub-máximas: 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90% del $\text{VO}_{2\text{max}}$. Estas intensidades fueron calculadas teniendo en cuenta los resultados de la primera prueba incremental realizada. Las intensidades fueron equivalentes al 30, 40, 50, 60, 70, 75 y 80% de la velocidad máxima alcanzada en el test máximo, i.e., $\text{media}\pm\text{SD}$; 5.3 ± 0.5 , 7.0 ± 0.7 , 8.8 ± 0.9 , 10.5 ± 1.1 , 12.3 ± 1.3 , 13.6 ± 1.6 y $15.1\pm 1.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Entre cada intensidad se intercaló un periodo de recuperación pasiva de 5 min. La pendiente de tapiz (h/p/cosmos Pulsar, h/p/cosmos sports & medical gmbh, Nussdorf, Germany) se mantuvo a un 1% durante todas las pruebas. Los sujetos fueron refrigerados continuamente en todas las pruebas por medio de dos ventiladores colocados a los lados del tapiz. El intercambio de gases respirados y la FC fueron registrados continuamente

utilizando un analizador de gases (Medisoft Ergocard, Medisoft Group, Sorinnes, Belgium), y cada 5 s (Polar Vantage NV, Polar Electro Oy, Finland), respectivamente. Por último, en los últimos 10 s de cada minuto se recogió la RPE de los sujetos. Para determinar la relación VO_2 -velocidad, solo se tuvo en cuenta el VO_2 promedio de los 2 últimos minutos de cada intensidad (Lucia, Esteve-Lanao, Oliván & cols., 2006). Además, de la recta de economía obtenida del análisis de regresión lineal de las variables VO_2 y velocidad, se calculó otra donde se sustituyó el punto de corte “y” de la relación VO_2 -velocidad por el valor del VO_2 basal de los sujetos (Noordhof, de Koning & Foster, 2010). Éste fue determinado el segundo día de pruebas, antes de realizar el calentamiento.

Test supra-máximo

Tras un calentamiento de 10 min, como previamente se mencionó, los sujetos realizaron un test supra-máximo al 110% de la velocidad máxima alcanzada (media \pm SD; 18.5 \pm 2.1 km·h⁻¹) en el test incremental del primer día de pruebas. El test se realizó con una pendiente del tapiz rodante (h/p/cosmos Pulsar, h/p/cosmos sports & medical gmbh, Nussdorf, Germany) del 1%. Los sujetos mantuvieron la carga de trabajo hasta la extenuación, la prueba finalizó cuando fueron incapaces de mantener la velocidad fijada. Durante toda la prueba fueron registrados los gases respirados respiración a respiración (Medisoft Ergocard, Medisoft Group, Sorinnes, Belgium). El déficit máximo acumulado de oxígeno fue estimado como la diferencia entre el VO_2 integrado sobre todo el periodo de ejercicio y la predicción realizada por medio de la relación VO_2 -velocidad obtenida con la realización de las pruebas sub-máximas (Medbo, Mhon, Tabata & cols., 1988).

Análisis estadístico

Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar (SD). Se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para determinar la normalidad de la muestra. La comparación de la relación VO_2 -velocidad, demanda de O_2 , déficit de O_2 y porcentajes de contribución aeróbico y anaeróbico calculados por las diferentes metodologías usadas en el estudio se realizó utilizando un análisis de la varianza (ANOVA) con medias repetidas. Cuando se obtuvo un valor *F* significativo, se aplicó el test de Bonferroni para establecer las diferencias significativas entre medias. Los resultados obtenidos en las dos pruebas incrementales, tanto para valorar el metabolismo anaeróbico como aeróbico, se analizaron usando una *t* de student para muestras relacionadas. Este mismo análisis se utilizó para comparar en cada escalón las variables analizadas en los test incrementales. Las relaciones entre variables fueron determinadas usando el coeficiente de correlación de Pearson (*r*). La concordancia y fiabilidad entre resultados fue analizada por medio del coeficiente de correlación intraclass (ICC) y del método Bland-Altman. Valores de $p < 0.05$ fueron considerados como estadísticamente significativos. El coeficiente de variación (CV) fue calculado por medio de la relación entre la SD y la media de las variables y expresado en tanto por ciento. El software estadístico SPSS+ v.19.0 fue usado para este análisis.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran las rectas de economía obtenidas con la realización de los tests submáximos y derivada de la prueba incremental. La pendiente de la recta fue mayor ($p < 0.05$) en la recta obtenida con la realización de los tests submáximos. El punto de corte “y” de menor valor ($p < 0.05$) se obtuvo en la recta de economía original. Las mayores ($p < 0.05$) demandas de O_2 para la velocidad supramáxima elegida en el estudio se encontraron cuando en la recta de economía se substituyó el valor de “y” por el VO_2 basal de los sujetos (Tabla 1).

Tabla 1. Rectas de economía y demanda total de O_2 estimada en el test supramáximo (media \pm SD) calculadas: 1- utilizando la relación VO_2 -velocidad de las pruebas submáximas, 2- utilizando la relación VO_2 -velocidad de las pruebas submáximas y substituyendo el punto de corte “y” por el valor del VO_2 basal de los sujetos y 3- atendiendo a la metodología propuesta por Pouilly & Busso (2008).

	1	2	3
Pendiente de la recta	3.91 \pm 0.60 [†]	3.91 \pm 0.60 [†]	2.99 \pm 0.34
Punto de corte “y”	-2.88 \pm 4.60 ^{*†}	6.45 \pm 1.07	8.20 \pm 6.17
Demanda de O_2 (ml·kg ⁻¹)	166.9 \pm 38.9 ^{*†}	190.1 \pm 50.5 [†]	153.2 \pm 36.5

^{*}, diferencias significativas con 2 ($p < 0.05$). [†], diferencias significativas con 3 ($p < 0.05$).

La duración del test supramáximo fue de 2.4 \pm 0.6 min. Durante este tiempo los sujetos consumieron una media de 45.8 \pm 6.0 ml·kg⁻¹·min⁻¹ de O_2 . Analizando los déficit máximos de oxígeno acumulado en el test supramáximo los menores valores ($p < 0.05$) se obtuvieron cuando se empleó la relación VO_2 -velocidad de la prueba incremental para estimar la demanda de O_2 . Los mayores valores ($p < 0.05$) se encontraron cuando se empleó el VO_2 basal de los sujetos como valor de “y”, lo cual conllevó que usando esta metodología se analizara el mayor ($p < 0.05$) porcentaje de contribución anaeróbica (Tabla 2). Cuando se utilizó esta última metodología, no se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$) con el déficit máximo de oxígeno acumulado hallado en la prueba incremental (Tabla 2). La mayor ($p < 0.05$) y menor ($p < 0.05$) contribución aeróbica y anaeróbica, respectivamente, fue analizada en el test incremental (Tabla 2). En la Tabla 3 se muestran las correlaciones analizadas entre las diferentes metodologías para valorar el déficit máximo acumulado de oxígeno.

Tabla 2. Déficit máximos de O₂ y porcentajes de contribución aeróbico y anaeróbico analizados en el test supramáximo e incremental.

		Déficit de O ₂ (ml·kg ⁻¹)	% aeróbico	% anaeróbico
Test supramáximo	1	54.8 ± 16.8*†‡	66.7 ± 7.8*†‡§	33.3 ± 7.8*†‡§
	2	80.0 ± 28.6†	58.4 ± 8.2†‡§	41.6 ± 8.2†‡§
	3	44.5 ± 12.8‡	71.0 ± 7.3‡§	29.0 ± 7.3‡§
Test incremental	4	93.2 ± 46.1	84.2 ± 6.9	15.8 ± 6.9
	5	61.9 ± 46.6	88.9 ± 8.3	11.1 ± 8.3

1- utilizando la relación VO₂-velocidad de las pruebas submáximas; 2- utilizando la relación VO₂-velocidad de las pruebas submáximas y sustituyendo el punto de corte “y” por el valor del VO₂ basal de los sujetos; 3 y 4- atendiendo a la metodología propuesta por Pouilly & Busso (2008); 5- atendiendo a la metodología propuesta por Pouilly & Busso (2008) pero sustituyendo el punto de corte “y” por el valor del VO₂ basal de los sujetos. *, diferencias significativas con 2 ($p < 0.05$). †, diferencias significativas con 3 ($p < 0.05$). ‡, diferencias significativas con 4 ($p < 0.05$). §, diferencias significativas con 5 ($p < 0.05$).

El estudio de la reproductibilidad del déficit máximo acumulado de oxígeno determinado durante la realización de un test incremental indicó una alta variabilidad de los resultados (Tabla 4). Además de esta variable, se analizaron altos coeficientes de variabilidad para el punto de corte “y” de la relación VO₂-velocidad y el porcentaje de contribución anaeróbico. Se hallaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las demandas de O₂ analizadas en las pruebas incrementales y el déficit de O₂, porcentaje de contribución aeróbico y anaeróbico cuando se utilizó el VO₂ basal como punto de corte “y” de la relación VO₂-velocidad (Tabla 4).

Tabla 3. Correlaciones entre las diferentes metodologías usadas para valorar el déficit máximo de O₂ acumulado.

	1	2	3	4	5
1		$r=0.94$ $p<0.001$	$r=0.65$ $p<0.01$	$r=0.44$ $p>0.05$	$r=-0.28$ $p>0.05$
2			$r=0.55$ $p<0.05$	$r=0.35$ $p>0.05$	$r=-0.07$ $p>0.05$
3				$r=0.58$ $p<0.05$	$r=0.03$ $p>0.05$
4					$r=-0.12$ $p>0.05$

1- en el test supramáximo utilizando la relación VO₂-velocidad de las pruebas submáximas; 2- en el test supramáximo utilizando la relación VO₂-velocidad de las pruebas submáximas y sustituyendo el punto de corte “y” por el valor del VO₂ basal de los sujetos; 3 y 4- atendiendo a la metodología propuesta por Pouilly & Busso (2008) en el test supramáximo e incremental, respectivamente; 5- en el test incremental atendiendo a la metodología propuesta por Pouilly & Busso (2008) pero sustituyendo el punto de corte “y” por el valor del VO₂ basal de los sujetos.

Tabla 4. Reproducibilidad de la medición de las variables analizadas (media±SD) durante el test incremental.

	Prueba 1	Prueba 2	ICC	CV
Pendiente de la recta	2.99 ± 0.34	3.12 ± 0.39	0.60, $p<0.05$	7.5 ± 5.3
Punto de corte “y”	8.20 ± 6.17	8.24 ± 5.79	0.87, $p<0.001$	50.6 ± 81.7
Demanda de O ₂ ¹ (ml·kg ⁻¹)	574.8 ± 133.3*	612.5 ± 124.6	0.95, $p<0.001$	7.2 ± 5.0
Déficit de O ₂ ¹ (ml·kg ⁻¹)	93.2 ± 46.1	120.6 ± 65.3	0.75, $p<0.01$	35.9 ± 26.9
% aeróbico ¹	84.2 ± 6.9	80.9 ± 9.4	0.59, $p<0.05$	5.7 ± 4.4
% anaeróbico ¹	15.8 ± 6.9	19.1 ± 9.4	0.59, $p<0.05$	30.4 ± 25.6
Demanda de O ₂ ² (ml·kg ⁻¹)	543.5 ± 124.9*	587.6 ± 9	0.93, $p<0.01$	8.3 ± 4.6
Déficit de O ₂ ² (ml·kg ⁻¹)	61.9 ± 46.6*	95.7 ± 55.3	0.64, $p<0.05$	55.9 ± 46.9
% aeróbico ²	88.9 ± 8.3*	84.0 ± 8.1	0.51, $p<0.05$	5.9 ± 4.7
% anaeróbico ²	11.1 ± 8.3*	16.0 ± 8.1	0.51, $p<0.05$	50.6 ± 49.6

¹atendiendo a la metodología propuesta por Pouilly & Busso (2008); ²atendiendo a la metodología propuesta por Pouilly & Busso (2008) pero sustituyendo el punto de corte “y” por el valor del VO₂ basal de los sujetos. *, diferencias significativas ($p<0.05$).

No se encontraron diferencias significativas en ninguna de las variables analizadas en la primera y segunda prueba incremental (Tabla 5). Se analizaron unos altos ICC y bajos CV en la mayoría de las variables, salvo para la RPE en el RCT y VT. Estos resultados indican la alta fiabilidad y reproducibilidad de las variables, salvo para la RPE. El análisis Bland-Altman reveló unas diferencias entre las velocidades, consumos de O₂ y frecuencia cardiaca máxima (Figura 2), en el RCT (Figura 3) y VT (Figura 4) entre la primera y segunda prueba cercanas al valor 0. Además, el 95% de los sujetos se encontraron entre los límites de acuerdo calculados, lo que indicó una alta concordancia entre las variables.

Cuando se analizó el comportamiento del consumo de O₂, frecuencia cardiaca y RPE a lo largo de las pruebas de esfuerzo realizadas no se encontraron diferencias significativas en ninguno de los escalones completados (Figura 5).

Tabla 5. Resultados (media±SD) obtenidos en el primer y segundo test incremental.

	Prueba 1	Prueba 2	ICC	CV
VO _{2max} (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	54.2 ± 6.8	55.1 ± 6.4	0.91	3.9 ± 2.1
Velocidad _{max} (km·h ⁻¹)	17.5 ± 1.8	17.9 ± 1.7	0.93	2.6 ± 1.8
FC _{max} (ppm)	190 ± 7	190 ± 6	0.96	0.7 ± 0.6
VO _{2 RCT} (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	45.6 ± 6.4	45.9 ± 5.7	0.96	3.0 ± 2.1
% VO _{2 RCT}	84.2 ± 5.7	83.4 ± 4.3	0.84	3.9 ± 2.9
Velocidad _{RCT} (km·h ⁻¹)	14.2 ± 1.6	14.4 ± 1.3	0.95	2.5 ± 2.7
FC _{RCT} (ppm)	174 ± 12	174 ± 9	0.96	1.4 ± 1.2
RPE _{RCT}	6.4 ± 1.5	6.0 ± 1.2	0.64	14.6 ± 9.3
VO _{2 VT}	35.6 ± 5.6	35.6 ± 4.7	0.87	4.9 ± 3.9
% VO _{2 VT}	65.7 ± 6.6	64.8 ± 5.3	0.76	4.0 ± 2.1
Velocidad _{VT}	10.5 ± 1.5	10.7 ± 1.4	0.90	3.9 ± 4.7
FC _{VT}	150 ± 13	150 ± 11	0.93	2.2 ± 2.1
RPE _{VT}	2.8 ± 1.0	2.5 ± 0.7*	0.09	24.1 ± 18.3

RCT, umbral de compensación respiratoria; VT, umbral ventilatorio; RPE, percepción subjetiva del esfuerzo.

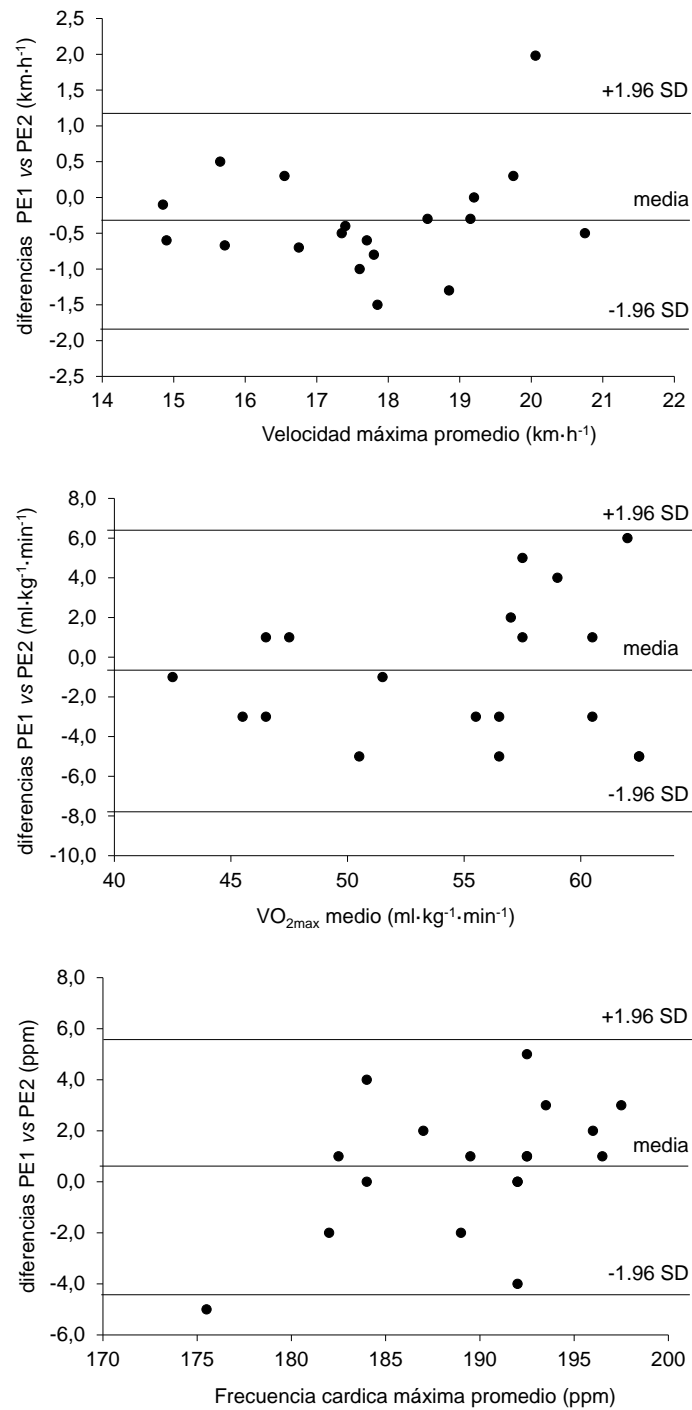


Figura 2. Gráfico Bland-Altman con diferencias estimadas y límites de acuerdo al 95% para la velocidad máxima, consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}) y frecuencia cardiaca máxima obtenidas en la primera (PE1) y segunda (PE2) prueba incremental máxima.

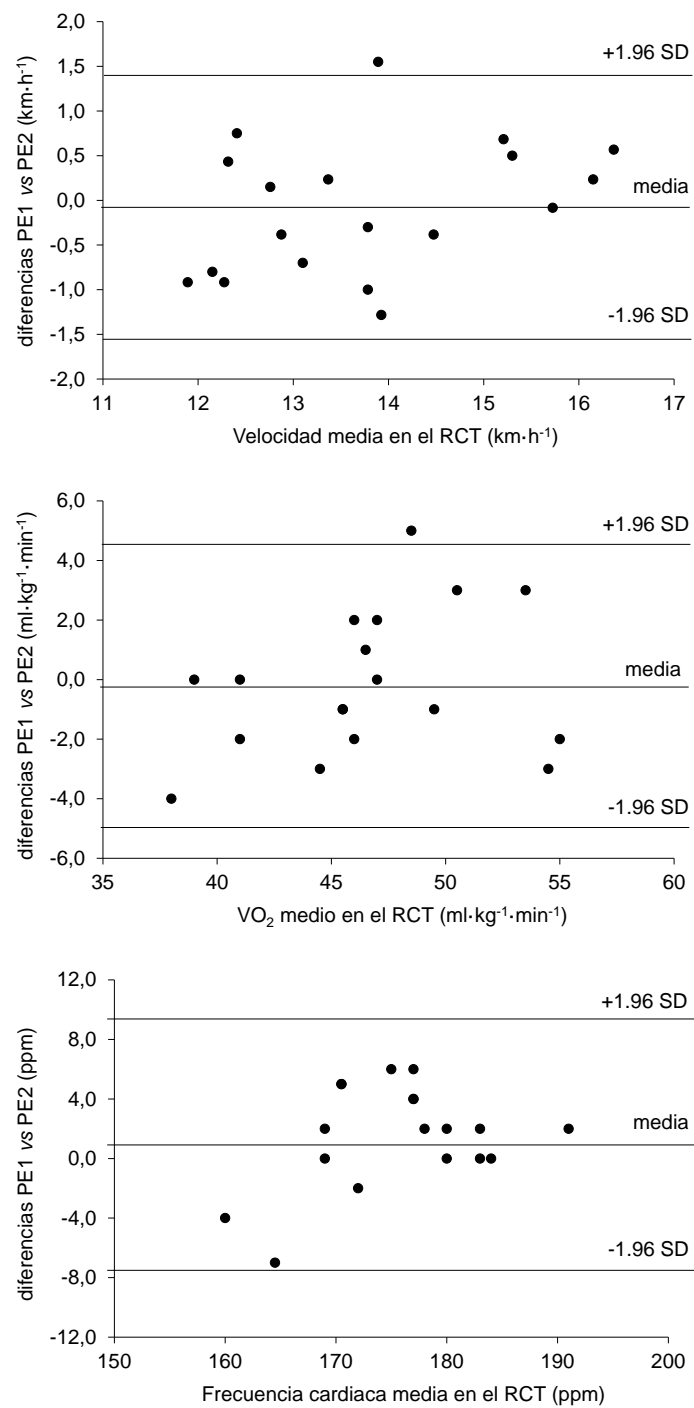


Figura 3. Gráfico Bland-Altman con diferencias estimadas y límites de acuerdo al 95% para la velocidad, consumo de oxígeno (VO₂) y frecuencia cardiaca en el umbral de compensación respiratoria (RCT) obtenidas en la primera (PE1) y segunda (PE2) prueba incremental máxima.

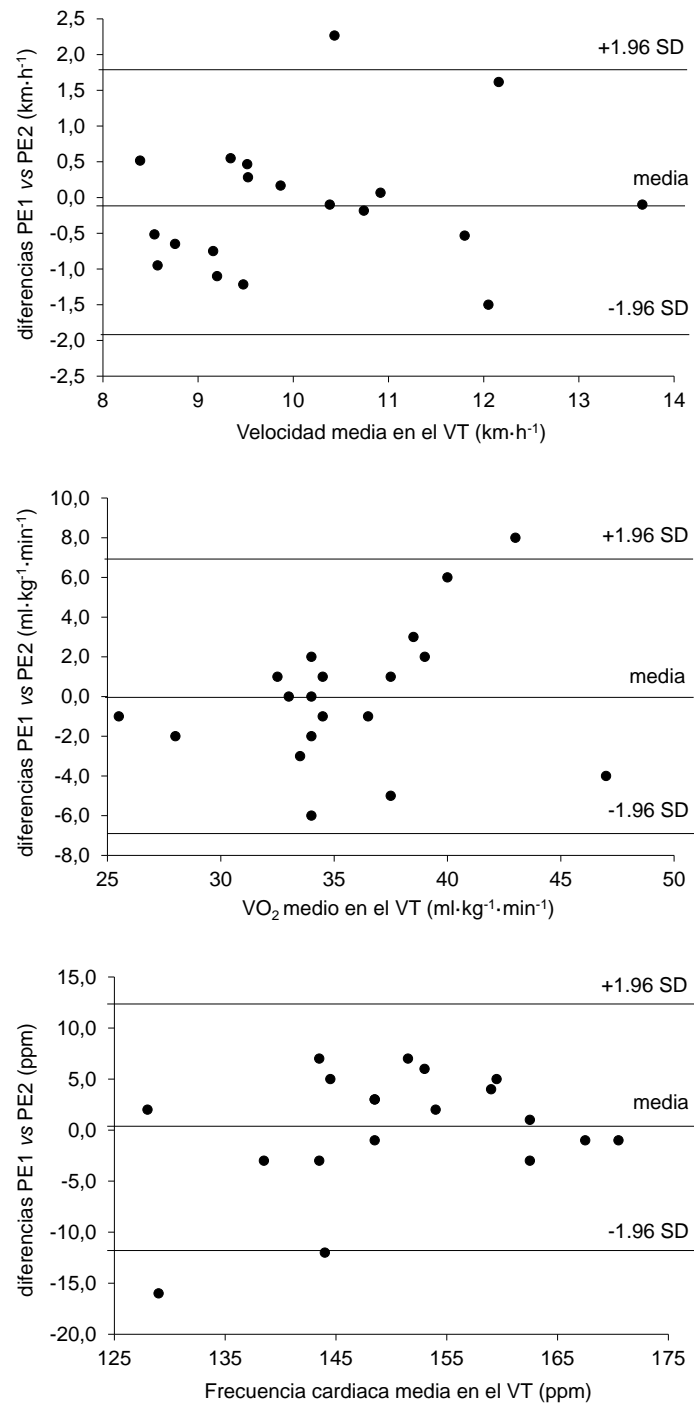


Figura 4. Gráfico Bland-Altman con diferencias estimadas y límites de acuerdo al 95% para la velocidad, consumo de oxígeno (VO₂) y frecuencia cardiaca en el umbral ventilatorio (VT) obtenidas en la primera (PE1) y segunda (PE2) prueba incremental máxima.

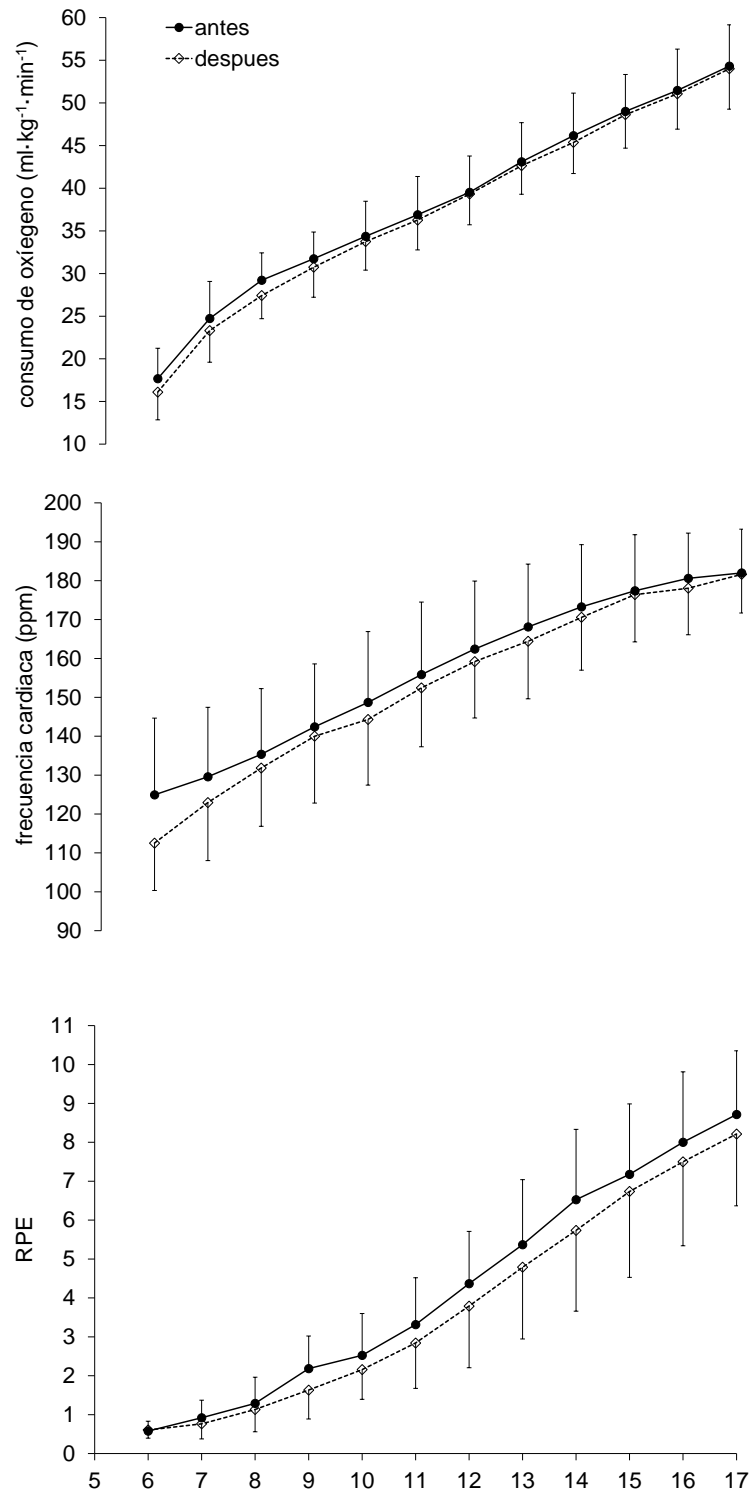


Figura 5. Evolución del consumo de oxígeno, frecuencia cardiaca y percepción subjetiva del esfuerzo en la primera y segunda prueba incremental máxima.

DISCUSIÓN

El reto de este estudio es la estimación de la capacidad anaeróbica de una manera más simple, no como proponen (Medbo, Mohn, Tabata, Bahr, & cols., 1988), el cual necesita de tres pruebas para calcular la capacidad anaeróbica. Entonces decidimos hallar este cálculo como proponían, (Pouilly & Busso, 2008), esta vez corredores en vez de ciclistas y donde el principal hallazgo de este estudio, al igual que en de los autores citados anteriormente, es que a medida que se desarrolla una prueba de esfuerzo y aumenta la intensidad del ejercicio, el déficit de O₂ se va acumulando, de forma progresiva, a mayor intensidad. Sin embargo, en contra de lo analizado por estos autores, nuestro estudio arroja diferencias significativas con los resultados obtenidos en la metodología tradicional para el cálculo del déficit de O₂. Además, se encontraron unas bajas correlaciones entre métodos (Tabla 3). Pouilly & Busso (2008) hablan de un retardo de 45 segundos para una posible correlación entre el déficit máximo acumulado de oxígeno y el déficit de O₂ estimado en la prueba incremental, como apoyan otros estudios (Davis, J.A., Whipp, B.J., Lamarra & cols., 1982; Hansen, J.E., Casaburi R., Cooper, D.M. & Wasserman, K., 1988; Whipp, B.J., Davis, J.A., Torres, F., Wasserman, K., 1981) referenciados por Pouilly & Busso (2008) para evitar el componente lento inicial y ser más eficaz y preciso a la hora de medir la capacidad anaeróbica, sin embargo nosotros hemos cogido un retardo de 31 segundos medios entre todos los individuos, pues depende de cada individuo y la intensidad a la que desarrolle la prueba supramáxima, para calcular el tiempo medio de respuesta y hallar el déficit de O₂. A mayor intensidad/velocidad mayor será el tiempo a restar para obtener el tiempo medio de respuesta.

Como nos indica (Zoladz et al. 1995) en (Hill, D.W., Ferguson, C.S. & Ehler, K.L., 1998) apoyado en otros estudios, cuando se calcula el coste de O₂ por minuto, de una constante (demanda de O₂) por velocidad, se describe una relación lineal desde el origen. La intersección “y” en la recta de regresión para ejercicios que están por debajo del umbral anaeróbico la relación VO₂-intensidad está en torno a 5 ml·(kg·min)⁻¹.

Los valores que nos encontramos para la demanda en PE1 (543.5 ± 124.9 ml·kg⁻¹) y PE2 (587.6 ± 9 ml·kg⁻¹) y con la corrección de “y” en la recta, para estimar el consumo de O₂ teórico P1 (574.8 ± 133.3 ml·kg⁻¹) y PE2 (612.5 ± 124.6 ml·kg⁻¹) (tabla 4) no se relacionan con los de (Pouilly & Busso, 2008) que es (813,2 ± 127,59), a pesar de estar muy por encima de los alcanzados en el test supramáximo con diferentes metodologías (166.9 ± 38.9 ml·kg⁻¹), (190.1 ± 50.5 ml·kg⁻¹) y (153.2 ± 36.5 ml·kg⁻¹), así como también difieren con los valores de otros estudios en los que se aplican métodos alternativos para estimar la capacidad anaeróbica, como el de (Bertuzzi, Franchini, Ugrinowitsch, Kokubun, Lima-Silva, Pires, Nakamura, & Kiss, 2010) de (151 ± 31 ml·kg⁻¹), aunque sí muy similar a la utilizada en el test supra-máximo. No obstante lo que si ocurre es que nuestra correlación con el método tradicional es ínfima, siendo inferior de (r=0,50) en más de la mitad de las metodologías utilizadas, destacando las de las pruebas de esfuerzo, siendo la más alta en relación con el resto de (r=0,28) (tabla 3), respecto al MAOD_{alternativo} que propusieron (Bertuzzi, Franchini, Ugrinowitsch, Kokubun, Lima-Silva, Pires, Nakamura, & Kiss, 2010) que era de (r=0,78) respecto al MAOD_{tradicional}.

Mientras los valores obtenidos en las distintas vías metabólicas para ejercicios intensos de corta duración, en nuestro caso será PE1 vía anaeróbica (88.9 ± 8.3) y vía aeróbica (11.1 ± 8.3) y en la PE 2 contribución anaeróbica (84.0 ± 8.1) y aeróbica (16.0 ± 8.1), mientras para (Bertuzzi, Franchini, Ugrinowitsch, Kokubun, Lima-Silva, Pires, Nakamura, & Kiss, 2010) es de 78% vía láctica y 22% vía aláctica.

De manera que calculando el déficit de O_2 de una forma u otra se obtienen diferentes resultados, que pueden estar correlacionados, pudiendo compararse diferentes métodos para un mismo estudio y/o sujeto o no, simplemente que solo valga para evaluar a un sujeto sin ser posible introducir o comparar varios métodos. Los tres primeros métodos tradicionales de nuestro estudio, no obstante el primero, es el que más respeta el protocolo original, el resto difiere a la hora de calcular la demanda de O_2 , Por lo tanto, modificando la recta con el consumo de oxígeno basal, para P1 ($93.2 \pm 46.1 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$), y PE2 ($120.6 \pm 65.3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$) más alto que según la metodología de (Pouilly & Busso, 2008) PE1 ($61.9 \pm 46.6 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$) y PE2 ($95.7 \pm 55.3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$). Como consecuencia el segundo, con su recta es el déficit que más se aproxima a los protocolos descritos en Medbo, Mohn, Tabata, Bahr, & cols. (1988) y Medbo & Burgers (1990) para corredores ($64 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$), a excepción de que ellos introdujeron pendiente en su protocolo y nosotros no. Los primeros son protocolos que se derivan del uso de un test incremental, no tienen buena correlación con los métodos tradicionales ni entre ellos. El déficit calculado con la metodología tradicional no se aleja de los resultados obtenidos por Gardner, Osborne, & cols. (2003) ($52.33 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$). Así mismo, en un estudio realizado con corredores (Bangsbo & cols., 1993) se obtuvieron déficits de $51.9 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ comparables a los déficits hallados en el presente estudio utilizando la recta de economía sin modificar o utilizando la recta con el VO_2 basal de los sujetos. Los resultados obtenidos por Bickham & cols. (2002) ($43.3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$) (Noordhof, de Koning, & Foster, 2010) y ($42 \pm 22 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$) de (Hill, D.W., Ferguson, C.S. & Ehler, K.L., 1998) se aproximan más a los obtenidos en este estudio cuando se empleó la recta de economía calculada con los datos obtenidos en la prueba incremental. Además, también se han referenciado valores de déficit de entorno al 30.9- 73.8 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Bosquet, Duchene, Delhors & cols., 2008). Las diferencias encontradas entre los diferentes valores referenciados en los estudios podrían ser debidas a las características de los sujetos (nivel, sexo y deporte practicado). Sabiendo que uno de nuestros mayores problemas fue la reproductibilidad del método que era muy variable, por lo tanto no podemos utilizar este método como preciso y eficaz.

CONCLUSIONES

La utilización de un test incremental para la estimación del déficit máximo acumulado de oxígeno en atletas no es un método válido ni fiable. A pesar de la no existencia de diferencias significativas entre el déficit de O_2 calculado en el test incremental y el hallado en el test supra-máximo usando el VO_2 basal de los sujetos para ajustar la recta de economía, la alta variabilidad del déficit de O_2 calculado en el test incremental hace de esta una metodología no fiable. Futuros trabajos deben realizarse para determinar si el uso de un protocolo más rectangular en el test incremental mejora la estimación del déficit de oxígeno.

La valoración del metabolismo aeróbico (i.e., VO_{2max} y umbrales ventilatorios) a través de un test incremental, con los incrementos de carga utilizados en este estudio, es muy fiable debido a la baja variabilidad de los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Andrade, V.L., Zagatto, A.M., Kalva-Filho, C.A., Mendes, O.C., Gobatto, C.A., Campos, E.Z. & Papoti, M. (2015). Running-based anaerobic sprint test as a procedure to evaluate anaerobic power. *Int. J. Sports Med.*, 36, 1-7.
2. Bergstrom, H., Housh, T., Zuniga, J., Camic, C. & cols. (2012). Estimates of Critical Power and Anaerobic Work Capacity from a Single, All-Out Test of Less than 3-Min. *J. Sports Med Dopng Stud.*, 2.
3. Bertuzzi, R.C.M., Franchini, E., Ugrinowitsch, C., Kokubun, E., Lima-Silva, A.E., Pires, F.O., Nakamura, F.Y. & Kiss, M.A.P.D.M., (2010). Predicting MAOD Using Only a Supramaximal Exhaustive Test. *Sports Med.*, 31, 477 – 481.
4. Borg, G. (1982). Psychophysical bases of perceived exertions. *Med Sci Sports Exerc.*, 14, 377-381.
5. Bosquet, L., Duchene, A., Delhors, P.R., Dupont, G. & Carter, H. (2008). A comparison of methods to determine maximal accumulated oxygen deficit in running. *J Sports Sci.*, 26, 663-670.
6. Clare, L.W. & Donald A.S. (2000). Maximal accumulated oxygen deficit expressed relative to the active muscle mass for cycling in untrained male and female subjects. *Eur J Appl Physiol.*, 82, 255-261.
7. Daniels, J., Scardina, N., Hayes, J. & Foley, P. (1984). Variations in VO_{2submax} during treadmill running. *Med Sci Sports Exerc.*, 16, 108.
8. Davis, J.A. (1985). Anaerobic threshold: Review of the concept and directions for future research. *Med Sci Sports Exer.*, 17, 6-18.
9. Dorado, C., Chavarren, J., & López, J.A. (1997). Influencia del procedimiento empleado para determinar la recta de economía de pedaleo en el cálculo del déficit máximo de oxígeno acumulado. *Revist. Motricidad*, 3, 17-32.
10. Fletcher, J.R., Esau, S.P. & Macintosh, B.R. (2009). Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *J Appl Physiol.*, 107, 1918-1922.
11. Gardner, A., Osborne, M. & cols. (2003). A comparison of two methods for the calculation of accumulated oxygen deficit. *J Sports Sci.*, 21, 155-162.
12. Gastin, P.B. (1994). Quantification of anaerobic capacity. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 4, 91-112.
13. Haseler, L.J., Hogan, M.C. & Richardson, R.S. (1999). Skeletal muscle phosphocreatine recovery in exercise-trained humans is dependent on O₂ availability. *Americ. Physiol. Societ.*

14. Hill, D. W. & Vingren, J. L. (2011). Maximal accumulated oxygen deficit in running and cycling. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 36, 831-838.
15. Hill, D.W., Ferguson, C.S. & Ehler, K.L. (1998). An alternative method to determine maximal accumulated O₂ deficit in runners. *Eur J Appl Physiol.*, 79, 114-117.
16. Hill, D.W. (1996). Determination of accumulated O₂ deficit in exhaustive short-duration exercise. *Can. J. Appl. Physiol.*, 21(1), 63-74.
17. Lucia, A., Esteve-Lanao, J., Oliván, J., Gómez-Gallego, F., San Juan, A.F., Santiago, C., Pérez, M., Chamorro-Viña, C. & Foster C. (2006). Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Appl Physiol Nutr Metab.*, 31, 530-540.
18. Medbo J. I. & Burgers, S. (1990). Effect of Training on the anaerobic capacity. *Med Sci Sports Exerc.*, 22, 501-507.
19. Medbo, J. I., Mohn A.-C., Tabata, I., Bahr, R., & cols. (1988). Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol.*, 64, 50-60.
20. Mezzani, A., Corrà, U., Sassi, B., Colombo, R., y cols. (2006). Maximal Accumulated Oxygen Deficit in Patients with Chronic Heart Failure. *Med Sci Sports Exerc.*, 38, 424-432.
21. Minahan, C., Chia, M. & Inbar, O. (2007). Does Power Indicate Capacity? 30-s Wingate Anaerobic Test vs. Maximal Accumulated O₂ Deficit. *Int J Sports Med.*, 28, 836-843.
22. Morgan, D.W., Craib, M.W., Krahenbuhl, G.S., Woodall, K., Jordan, S., Filarski, K., Burlison, C. & Williams, T. (1994). Daily variability in running economy among well-trained male and female distance runners. *Res Q Exerc Sport.*, 65, 72-77.
23. Noordhof, D.A., de Koning, J.J & Foster, C. (2010). The Maximal Accumulated Oxygen Deficit Method A Valid and Reliable Measure of Anaerobic Capacity? *Sports Med.*, 4, 285-302.
24. Noordhof, D.A., Vink, D.M.T., de Koning, J.J & Foster, C. (2011). Anaerobic Capacity: Effect of Computational Method. *Int J Sports Med.*, 32, 422-427.
25. Nummela, A., Hämmäläinen, I. & Rusko, H. (2007). Comparison of maximal anaerobic running test on a treadmill and track. *J. Sports Sci.*, 25(1), 87-96.
26. Nummela, A., Alberts, M., Rijntjes, R.P., Luthtanen, P. & Rusko, H. (1996). Reliability and validity of the Maximal Anaerobic Running Test. *Int. J. Sports Med.*, 17, 97-102.
27. Pouilly, J.P. & Busso T. (2008). Accumulated Oxygen Deficit during Ramp Exercise. *Int J Sports Med.*, 29, 16-20.
28. Pugh, L.G. (1970). Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance. *J Physiol.*, 207, 823-835.
29. Ravier, G., Dugue, B., Grappe, F. & Rouillon, J.-D. (2005). Maximal Accumulated Oxygen Deficit and Blood Responses of Ammonia, Lactate and pH after Anaerobic Test: a Comparison between International and National Elite Karate athletes. *Int J Sports Med.*, 26, 1-8.

30. Roberts, A.D., Clark, S.A., Townsend, N.E., Anderson, M.E., & cols. (2003). Changes in performance, maximal oxygen uptake and maximal accumulated oxygen deficit after 5, 10 and 15 days of live high: train low altitude exposure. *Eur J Appl Physiol.*, 88, 390-395.
31. Scott, C., Roby, F., Lohman, T. y Bunt, J., (1991). The Maximal Accumulated Oxygen Deficit as an Indicator of Anaerobic Capacity. *Med Sci Sports Exerc.*, 23, 618-624.
32. Zagatto, A., Redkva, P., Loures, L., Kalva-Filho, C., Franco, V., Kaminagakura, E. & Papoti, M. (2011). Anaerobic contribution during maximal anaerobic running test: correlation with maximal accumulated oxygen deficit. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*