

Monograph

Estudio Longitudinal en Corredores Masculinos de 3000 m: Relación entre el Rendimiento y Parámetros Fisiológicos Seleccionados

Juan Carlos Colado³, José A Bragada^{1,2}, Paulo J Santos³, José A Maia³, Vítor P Lopes^{1,2} y Tiago M Barbosa^{1,2}

¹*Polytechnic Institute of Bragança, Department of Sport Sciences, Bragança, Portugal.*

²*Research Centre in Sports, Health and Human Development, Vila Real, Portugal.*

³*CIFI2D, Sports Faculty, University of Porto, Porto, Portugal.*

RESUMEN

El propósito del presente estudio ha sido analizar los cambios longitudinales en el rendimiento de la carrera de 3000 m y la relación con diversos parámetros fisiológicos. Dieciocho corredores de media distancia masculinos bien entrenados fueron evaluados seis veces (3 por año) a lo largo de dos temporadas competitivas consecutivas. En cada ocasión se midieron los siguientes parámetros: el consumo de oxígeno máximo ($VO_2\text{máx.}$), la economía de la carrera (RE), la velocidad en el consumo de oxígeno máximo ($vVO_2\text{máx.}$), la velocidad en una concentración de lactato en sangre de $4\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (V4), y la velocidad de rendimiento ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) en pruebas cronometradas de 3000 m. Los valores estuvieron en el rango de 19.59 a $20.16\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, para el rendimiento de la carrera; de 197 a $207\text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, para la RE; de 17.2 a $17.7\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, para la V4; de 67.1 a $72.5\text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, para el $VO_2\text{máx.}$; y de 19.8 a $20.2\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, para la $vVO_2\text{máx.}$ Se utilizó un modelo lineal jerárquico para cuantificar las relaciones longitudinales entre el rendimiento de la carrera y las variables fisiológicas seleccionadas. El rendimiento de la carrera disminuyó de manera significativa con el transcurso del tiempo, entre cada uno de los momentos de evaluación la disminución en la velocidad de la carrera fue de $0.06\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Las variables que explicaron significativamente los cambios en el rendimiento fueron la V4 y la $vVO_2\text{máx.}$ Asimismo, la $vVO_2\text{máx.}$ y la V4 fueron las mediciones que guardaron la relación más fuerte con el rendimiento y pueden utilizarse para predecir la velocidad de la carrera de 3000 m. La mejor fórmula de predicción para el rendimiento de la carrera de 3000 m fue: $y = 0.646 + 0.626x + 0.416z$ ($R^2=0.85$); donde y = velocidad de V3000 m ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$), x = V4 ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) y z = $vVO_2\text{máx}$ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$). El alto poder predictivo de la $vVO_2\text{máx}$ y la V4 sugiere que tanto entrenadores como atletas, deberían poner la atención en mejorar estas dos variables fisiológicas, a fin de mejorar el rendimiento de la carrera.

Palabras Clave: seguimiento, rendimiento de la carrera, consumo de oxígeno máximo, lactato en sangre, economía de la carrera

INTRODUCCION

El rendimiento en la carrera de media distancia depende de varios parámetros fisiológicos, principalmente los que están relacionados con la potencia aeróbica máxima (VO_2 máx.). A menudo se reporta que los parámetros tales como el consumo de oxígeno máximo, la economía de la carrera (RE), la velocidad a una concentración de lactato en sangre de $4\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (V4), y la velocidad mínima en la que se produce el VO_2 máx guardan relaciones significativas con el rendimiento de la carrera (Billat, 1996; Houmard et al., 1991; Jones, 1998; Tanaka et al., 1986).

No obstante, algunos estudios (Brisswalter y Legros, 1994; Daniels, 1974; Houmard et al., 1991) han investigado los datos longitudinales con respecto al rendimiento de la carrera y su relación con las variables fisiológicas. Estos estudios incluyeron sólo algunos momentos de evaluación y midieron muy pocos parámetros fisiológicos. De hecho, algunos de ellos son estudios de casos o que utilizaron un tamaño de muestra pequeño y aplicaron ciertos incrementos poco realistas en el volumen y la intensidad del entrenamiento. Por esta razón es necesario que existan períodos de investigación más extensos, la utilización de más datos y el requisito de llevar a cabo la investigación en las condiciones de entrenamiento naturales del atleta. Utilizando este método debería ser posible determinar cambios en las mediciones fisiológicas, metabólicas y de rendimiento en corredores de distancia bien entrenados.

La potencia aeróbica máxima es un indicador fisiológico clave del rendimiento de la carrera de media distancia y también se considera un buen indicador del rendimiento en grupos heterogéneos, pero no homogéneos (Noakes, 1988). Algunos estudios han reportado una mejora en el VO_2 máx después del entrenamiento (Murase et al., 1981; Tanaka et al., 1984; 1986), mientras que otros han observado una estabilización a lo largo de un período de entrenamiento determinado (Houmard et al., 1991; Jones, 1998; Morgan et al., 1989). También se ha sugerido que “buenos” valores de RE (bajos) podrían proporcionar una ventaja importante durante la competencia, a pesar de que se reportaron relaciones débiles entre la RE y el rendimiento de la carrera de media distancia en grupos heterogéneos (Cunningham, 1990; Grant et al., 1997; Svedenhag y Sjödín, 1984; Yoshida et al., 1993). Además, la vVO_2 máx, parámetro que incorpora el VO_2 máx y la RE, ha mostrado tener una estrecha correlación con el rendimiento en carreras de medio fondo (Billat et al., 1994a; 1996; Jones, 1998). Otra variable fisiológica importante, que a menudo se la asocia con el rendimiento de carrera, es el máximo estado estable de lactato (Billat, 1996; Faude et al., 2009), que puede estimarse utilizando la V4 (Foxdal et al., 1994). De hecho, varios estudios longitudinales reportaron mejoras paralelas en el rendimiento de la carrera de media distancia y la V4 (Acevedo y Goldfarb, 1989; Tanaka et al., 1984).

Por lo tanto, el propósito principal del estudio fue cuantificar los cambios longitudinales (cambios intra-sujeto) y la relación entre el rendimiento en la carrera de 3000 m y diversos parámetros fisiológicos en un grupo de corredores de media distancia durante dos temporadas. En segundo lugar, se ha intentado determinar qué variables fisiológicas se pueden utilizar para predecir el rendimiento de la carrera de 3000 m.

METODOS

Participantes

Se evaluó a dieciocho corredores de media distancia masculinos bien entrenados (edad: 20 ± 3 años; masa corporal: 64.1 ± 6.2 kg; altura: 1.75 ± 0.05 m; rendimiento de 3.000 m: 9.05 ± 0.22 min; distancia de entrenamiento semanal: 80.5 ± 31.5 km; historia de entrenamiento: 6.0 ± 3.7 años). Todos los sujetos participaron de manera voluntaria y dieron su consentimiento por escrito. Todos los procedimientos se llevaron a cabo de acuerdo con la Declaración de Helsinki con respecto a la investigación en humanos. El Comité de Revisión Institucional del Instituto Politécnico de Bragança aprobó el estudio.

Procedimientos

El estudio se llevó a cabo durante dos años consecutivos. A cada corredor se lo evaluó en seis ocasiones, tres veces por año; concretamente en noviembre, dos meses después del comienzo de la temporada de entrenamiento; a mitad de la temporada (marzo); y en julio, al final de la temporada. En cada período de evaluación, se midieron el VO_2 máx, la vVO_2 máx, la RE, la V4 y el rendimiento en una carrera de 3000 m. Para cada período de evaluación determinado, los datos se recopilaban en el término de siete días. La intensidad del entrenamiento se redujo en todos los períodos de prueba. Todas las mediciones se llevaron a cabo en tres sesiones separadas: (i) rendimiento de la carrera (prueba cronometrada de 3000 m), (ii) determinación de la V4 y (iii) VO_2 máx, RE y vVO_2 máx. El orden de las sesiones de evaluación se realizó de

manera aleatoria entre los sujetos y las fechas. Hubo un período de recuperación de al menos dos días entre las sesiones de evaluación.

A fin de determinar el rendimiento en la carrera de 3000 m se organizaron dos grupos, según la residencia de los participantes y se invitó a otros corredores. La competencia de carrera se realizó en un estadio de atletismo y fue supervisada por un juez oficial de atletismo. Se eligió un día sin lluvia y con viento suave. Las instrucciones que se les dieron a los corredores fueron que corrieran al ritmo más elevado posible en la totalidad de la distancia. Este no fue un evento oficial sino una prueba cronometrada organizada. Se midieron los tiempos de rendimiento individual durante la competencia, y se calculó la velocidad promedio de carrera.

Recopilación de Datos

El consumo de oxígeno ($\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) se midió utilizando un sistema metabólico fijo respiración por respiración (Cortex, Model MetaLyzer 3B, Leipzig, Alemania), que incluyó un transmisor de la frecuencia cardiaca (Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia). El sistema metabólico fue calibrado en una habitación ventilada con el 15% de concentración de oxígeno de la presión atmosférica preponderante. El artefacto determinó la temperatura ambiente de manera automática. Se supusieron una concentración de oxígeno del 20.93% y dióxido de carbono del 0.03%. El aparato tuvo un 0.1% de error para la determinación de O_2 y CO_2 . En cada etapa, los valores de VO_2 se promediaron durante los últimos 30 segundos, y este valor se utilizó en cálculos posteriores.

Para determinar la RE, se utilizaron cuatro etapas, cada una de 5 minutos de duración, durante una carrera sub-máxima (pendiente 0%) en cinta ergométrica (Woodway, modelo 55 Sport, Alemania). La velocidad fue constante en todas las etapas y con incrementos de $1.45 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ de una etapa a la siguiente. El período de recuperación entre las etapas fue de 4 minutos. La elección de las cargas de trabajo se prescribió de manera individual, de modo que la velocidad utilizada en la última etapa fue próxima, pero inferior a la velocidad de carrera V4 del atleta. Durante este protocolo el VO_2 se midió de manera continua. Luego, se calculó la línea de regresión relacionando la velocidad de la carrera con el consumo de oxígeno. El VO_2 correspondiente a la velocidad al 90% de la V4 se calculó a partir de la ecuación de regresión.

Por último, la RE se determinó al 90% de la V4, según la siguiente ecuación:

$$\text{RE} = 1000\cdot\text{VO}_2/v \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde RE es la economía de la carrera ($\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$), VO_2 es el consumo de oxígeno ($\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) y v es la velocidad de la carrera ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$).

La evaluación del VO_2 y del $\text{VO}_{2\text{máx}}$ se llevó a cabo diez minutos después del protocolo de RE. Cada sujeto realizó un test incremental continuo hasta el agotamiento voluntario. La velocidad inicial siempre fue inferior a la velocidad V4 del atleta. Se utilizaron incrementos de $1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ cada dos minutos. El test se detenía cuando el participante daba la señal de que no podía continuar corriendo a la velocidad requerida. El consumo de oxígeno, el índice de intercambio respiratorio (RER) y la frecuencia cardiaca (HR) se registraron de manera continua y se promediaron durante los últimos 30 segundos de cada período de dos minutos (paso).

Se aceptaron como valores máximos al VO_2 y la HR más elevados registrados en cualquiera de los últimos pasos ($\text{VO}_{2\text{máx}}$ y $\text{HR}_{\text{máx}}$). El criterio principal para la determinación del $\text{VO}_{2\text{máx}}$ fue la existencia de un "estancamiento", lo que significa un incremento equivalente o menor a $2.0 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ en el o los últimos pasos.

La determinación del $\text{VO}_{2\text{máx}}$ se llevó a cabo mediante el análisis de los datos de medición del $\text{VO}_{2\text{máx}}$. La $v \text{ VO}_{2\text{máx}}$ se tomó como la velocidad correspondiente al paso en el cual el incremento en el VO_2 hacia el paso siguiente fue menor a $2 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Cuando no se observaba esto, la $v \text{ VO}_{2\text{máx}}$ se tomaba como la velocidad correspondiente al $\text{VO}_{2\text{máx}}$ (Shephard, 2000). Si el atleta sólo podía realizar la mitad del último paso de dos minutos se contaba sólo la mitad del incremento de la velocidad.

La determinación de la velocidad de la carrera en una concentración de lactato en sangre de $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (V4) se realizó durante una carrera en cinta ergométrica (pendiente 0%), según los procedimientos descritos anteriormente por Heck et al. (1985). A cada test le precedió una entrada en calor de 8 a 10 minutos a una velocidad inferior a la velocidad de la primera carrera. Las velocidades de carrera posibles eran: 12.2, 13.7, 15.1, 16.6, 18, 19.4 y $20.9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, se eligieron cuatro de estas velocidades para cada corredor, según su nivel competitivo, y cada velocidad se llevó a cabo durante 6 minutos. Entre los pasos, a los sujetos se les dio un período de descanso pasivo de 30 a 40 segundos para recolectar muestras de sangre para el análisis de lactato (YSI, 1500L Sport analyzer, Yellow Springs, EUA). Los valores de V4 se calcularon mediante una interpolación lineal, teniendo en cuenta los valores inmediatamente por encima y por debajo de $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ obtenidos durante el protocolo de prueba de V4.

La velocidad de la carrera de resistencia máxima estimada (Vend) se evaluó utilizando el VO₂máx, la RE y la fracción estimada de VO₂máx sostenida a lo largo de la carrera (F), según la ecuación 2 (di Prampero et al., 1986), método aceptado para predecir la velocidad de rendimiento de la carrera en diferentes distancias.

$$\text{Vend} = F \cdot \text{VO}_2\text{máx} \cdot \text{RE}^{-1} \text{ (Ecuación 2)}$$

(VO₂máx.: mL·kg⁻¹·min⁻¹, RE: mL·kg⁻¹·km⁻¹, Vend: km·min⁻¹)

Se advirtió que la fracción de VO₂máx (F) utilizada en la competencia de 3000 m podría expresarse mediante el índice entre la velocidad de V3.000 m/v VO₂máx y fue muy cercana a la unidad, por lo tanto se supuso que F = 1.

	1 ^{ra} Temporada (Noviembre)	1 ^{ra} Temporada (Marzo)	1 ^{ra} Temporada (Julio)	2 ^{da} Temporada (Noviembre)	2 ^{da} Temporada (Marzo)	2 ^{da} Temporada (Julio)
Rendimiento de la carrera (km·h⁻¹)	19.94 (1.49)	20.16 (1.44)	19.86 (1.51)	19.59 (1.23)	19.82 (1.47)	19.81 (1.43)
RE (mL·kg⁻¹·min⁻¹)	207 (18)	197 (12)	205 (10)	205 (13)	203 (15)	199 (12)
V4 (km·h⁻¹)	17.7 (1.4)	17.5 (1.6)	17.2 (1.7)	17.6 (1.6)	17.6 (1.5)	17.4 (1.6)
VO₂máx (mL·kg⁻¹·min⁻¹)	70.4 (9.0)	68.0 (6.2)	68.9 (6.2)	72.5 (7.2)	67.8 (7.1)	67.1 (7.5)
v VO₂máx (km·h⁻¹)	19.8 (1.4)	19.8 (1.4)	19.9 (1.5)	20.2 (1.4)	19.8 (1.4)	20.0 (1.6)

Tabla 1. Estadística descriptiva, media (±DE) a lo largo de las dos temporadas para todas las variables evaluadas.

Análisis Estadísticos

Se calcularon las estadísticas descriptivas (valores medios y desviaciones estándar) para todas las variables. Se utilizó un modelo lineal jerárquico (HLM) para analizar la relación entre el rendimiento de la carrera de 3000 m y las variables fisiológicas seleccionadas a lo largo de las 6 evaluaciones durante las dos temporadas. La estimación de probabilidad máxima se utilizó con el programa estadístico HML5 (Raudenbush et al. 2001).

El "Seguimiento" - la cantidad de veces que cada individuo permaneció en la misma "pista" de rendimiento (e.g. cuartil), determinado a partir de los tiempos de rendimiento individual, se calculó utilizando la estadística Kappa de Cohen con una versión 3.0 del programa de Análisis de Datos Longitudinales (Schneiderman et al., 1993). Se utilizaron los criterios cualitativos de Kappa [moderado (0.41-0.60), bueno (0.61-0.80) y muy bueno (0.81- 1.00)] (Landis y Koch, 1977). Se calcularon regresiones simples y múltiples entre las diferentes variables. El nivel de significancia estadística se estableció en $p \leq 0.05$.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran las estadísticas descriptivas (medias ± DE) para las variables de rendimiento y fisiológicas evaluadas en cada ocasión en las dos temporadas. El modelo lineal jerárquico mostró una disminución significativa en el rendimiento de la carrera en el tiempo. La disminución estimada en el rendimiento de la carrera, entre cada oportunidad de medición fue 0.06 km·h⁻¹. El efecto de la RE y el VO₂máx no fue significativo y no se incluyeron en el modelo final. Las variables fisiológicas que mejor explicaron los cambios en el rendimiento de la carrera fueron la V4 y la v VO₂máx. Para cada cambio de km·h⁻¹ en la V4 y la v VO₂máx el cambio en el rendimiento de la carrera fue de 0.43 y 0.32 respectivamente (Tabla 2). Con respecto al criterio cualitativo de los indicadores de seguimiento (Kappa de Cohen), el análisis mostró que "moderado" describió a la RE (k = 0.54) y al VO₂máx (k = 0.55); en contraste "bueno" describió a la V4 (k = 0.70) y la v VO₂máx (k = 0.71).

DISCUSION

De manera interesante, los cambios longitudinales en el rendimiento de la carrera, analizados por el HLM, mostraron que el rendimiento de la carrera de 3000 m disminuyó de manera significativa con el transcurso del tiempo. La disminución fue de $-0.06 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. No obstante, la V_4 y la $v \text{VO}_2\text{máx}$ tuvieron una contribución positiva para la modificación del rendimiento, en concreto $0.43 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ y $0.32 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ respectivamente (Tabla 2). Esto significa que un atleta que tuvo valores elevados en estas dos variables fisiológicas pudo haber reducido las disminuciones en el rendimiento con el transcurso del tiempo o incluso demostrado mejoras en el rendimiento.

Las disminuciones en el rendimiento pueden deberse a diferentes factores: (i) el volumen de entrenamiento promedio, aunque fue relativamente alto, no aumentó de manera significativa durante el período de 2 años; (ii) los objetivos del entrenamiento no fueron específicamente desafiantes como para mejorar el rendimiento en los 3000 m, porque los sujetos también estuvieron involucrados en otras distancias de carrera; (iii) el proceso de entrenamiento no se unificó, los atletas siguieron programas de entrenamiento diferido bajo la guía de diferentes entrenadores.

No se ha reportado la tendencia hacia una disminución en el rendimiento de la carrera (Jones, 1998; Tanaka et al., 1984; 1986). Tanaka et al. (1984) hallaron mejoras significativas en el rendimiento de la carrera de 5.000 y 10.000 m (13.2 s y 1 min 8 s respectivamente) en corredores universitarios durante un período de 9 meses. En otro estudio, el mismo grupo también reportó mejoras significativas en el rendimiento de 10 km luego de un período de entrenamiento de cuatro meses. En comparación, otros estudios no hallaron mejoras en el rendimiento de 8 km, también utilizando corredores universitarios (Houmard et al., 1991). Estos hallazgos sugieren que la mejora en el rendimiento de la carrera podría asociarse con un período de entrenamiento en el cual la carga de trabajo fue mayor a la habitual. Sin embargo, los incrementos sustanciales en las cargas de entrenamiento son difíciles de aplicar de manera simultánea en un grupo de corredores con diferentes entrenadores durante un período de tiempo prolongado. En el presente estudio, el volumen y la intensidad del entrenamiento no se incrementaron de manera intencional porque los atletas siguieron sus programas de entrenamiento habituales, según lo implementaron sus entrenadores.

Parámetro	Estimación (SE)	Intervalo de confianza de 95%
Efecto fijo		
Intersección	19.86 (0.13)	19.61 – 20.11
Tiempo	-0.06 (0.02)	-0.10 – -0.02
V_4	0.43 (0.09)	0.25 – 0.61
$\text{VO}_2\text{máx}$	0.32 (0.10)	0.12 – 0.52
Efectos aleatorios	Varianza	
IMC (Valores iniciales)	0.54 *	
Error Nivel 1	0.45	

Tabla 2. Especificación de los parámetros para el último modelo lineal jerárquico con errores estándar (SE) e intervalos de confianza. El rendimiento de la carrera (velocidad de V_{3000} m, en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) es la variable dependiente. La V_4 y la $v \text{VO}_2\text{máx}$ están en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$. *significativo en $p < 0.001$

Tradicionalmente, al $\text{VO}_2\text{máx}$ y a la RE se los considera variables importantes para explicar el rendimiento de la carrera. En el presente estudio el $\text{VO}_2\text{máx}$ y la RE no se incluyeron como variables explicativas en la realización del modelo de rendimiento de la carrera de 3000 m (utilizando el HLM). Esto significó que la RE y el $\text{VO}_2\text{máx}$ no fueron variables importantes para explicar los cambios en el rendimiento de la carrera. De hecho, previamente se ha observado la débil asociación entre la RE y el rendimiento en estudios de diseño transversal (Billat et al., 1994a; 1994c; 1996). En cuanto a todas las variables fisiológicas, la RE pareció ser el indicador menos importante del rendimiento de 3000 m. En realidad, se puede hallar una RE más elevada o más baja en atletas de 3000 m de cualquier nivel de competencia. Esto podría explicarse de manera parcial mediante la duración comparativamente corta de la carrera, y es probable que la función de la RE se vuelva más importante a medida que la distancia de la carrera aumente.

Los resultados del presente estudio demuestran que la V_4 y la $v \text{VO}_2\text{máx}$ fueron las variables que mejor pudieron explicar los cambios en el rendimiento de la carrera de 3000 m en el tiempo. Estas variables también se han identificado en estudios anteriores que incluyen corredores de media distancia (Colaço, 2002; Novo y Santos, 2002; Santos y Kruger,

2002). La V4, como expresión del máximo estado estable de lactato (Heck et al., 1985), es una de las variables más importantes en la carrera de distancia y supone gran relevancia en el rendimiento de la carrera de 3000 m.

La velocidad de la carrera de 3000 m varió entre 97 y 101% de la $v\text{VO}_2\text{máx}$ (promedio 100%). Esto sugiere que el ritmo de la carrera de 3000 m utiliza aproximadamente el 100% del $\text{VO}_2\text{máx}$, como observaron con anterioridad Billat et al. (1994b) y Jones (1998). Una explicación para la gran importancia de la $v\text{VO}_2\text{máx}$ es que esta variable integra tanto al $\text{VO}_2\text{máx}$ como a la RE en la misma medida. Por lo tanto, la relación entre la $v\text{VO}_2\text{máx}$ y el rendimiento de 3000 m hace que esta variable fisiológica sea una de las más relevantes para los corredores y entrenadores. Se considera que la determinación de la $v\text{VO}_2\text{máx}$ proporciona una herramienta importante que puede utilizarse en el entrenamiento, e.g. como una velocidad apropiada para utilizar durante el entrenamiento por intervalos.

Los resultados del presente estudio muestran que el estímulo de entrenamiento, específicamente en lo que respecta a intensidad y duración, no fue lo suficientemente fuerte como para promover mejoras sustanciales en el rendimiento de 3000 m. Aunque no se ha reunido una gran cantidad de datos en relación con el proceso de entrenamiento a lo largo del período de dos años, se reunió la información suficiente para que los entrenadores puedan concluir que el volumen promedio de entrenamiento semanal no aumentó de manera significativa a lo largo de los seis momentos de evaluación. Esto sugiere que puede ser necesario una intensidad más elevada o un volumen de entrenamiento mayor, y/u otras modificaciones al proceso de entrenamiento (e.g. diseños de periodización más eficaces, una intensidad mayor, la utilización de la pliometría, rutinas de recuperación más eficaces) para aumentar de manera significativa el rendimiento de la carrera de los atletas. Como resultado, no se ha podido confirmar la hipótesis inicial con respecto a la mejora en el rendimiento de la carrera.

Se ha intentado determinar qué variable fisiológica podría considerarse el mejor indicador del rendimiento de 3000 m y compararla con el procedimiento propuesto por di Prampero y colegas (1986) (Ecuación 2). En el presente estudio, la comparación entre el rendimiento de la carrera de 3000 m (velocidad de V3000 m), la $v\text{VO}_2\text{máx}$ y la Vend mostraron una gran similitud: el índice entre la velocidad de V3000 m real y la velocidad estimada calculada a partir de la ecuación de di Prampero et al. (1986) (Vend), varió entre 0.96 y 0.99. Asimismo se advirtió que la fracción de $\text{VO}_2\text{máx}$ (F) utilizada en pruebas cronometradas de 3000 m expresada por el índice entre la velocidad de V3000 m/ $v\text{VO}_2\text{máx}$ fue casi 1. Esto significó que, en las competencias de carrera, y cuando se utilizan distancias superiores a 3000 m, el valor de F disminuirá de manera progresiva mientras la distancia aumenta. Por otro lado, en las competencias de carrera menores a 3000 m, y dado que F no puede sobrepasar a 1, la contribución del metabolismo anaeróbico se vuelve progresivamente más importante. En este contexto, y dado que la ecuación de di Prampero no tiene en cuenta la contribución del metabolismo anaeróbico, parece ser que la ecuación de di Prampero es posible que no sea la más apropiada para estimar el rendimiento de la carrera de menos de 3000 m.

En el presente estudio se ha intentado predecir el rendimiento de la carrera de 3000 m en base a parámetros fisiológicos seleccionados. Los resultados de ambos análisis, de regresión lineal y múltiple, mostraron que tanto la V4 como la $v\text{VO}_2\text{máx}$ pueden utilizarse para predecir de manera individual el rendimiento de la carrera ($R^2 = 0.80$ y 0.77 respectivamente). Sin embargo, el rendimiento de la carrera de 3000 m pudo predecirse mejor utilizando ambas, V4 y $v\text{VO}_2\text{máx}$, en la misma ecuación. Por lo tanto:

$$y = 0.646 + 0.626x + 0.416z; R^2 = 0.85 \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde y es la velocidad de V3000 m ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$), x es la V4 ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) y z es la $v\text{VO}_2\text{máx}$ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$).

El alto poder predictivo de la $v\text{VO}_2\text{máx}$ y la V4 sugiere que ambos, entrenadores y atletas, deberían poner la atención en desarrollar estas dos variables fisiológicas a fin de mejorar el rendimiento de la carrera de 3000 m.

CONCLUSION

Los cambios longitudinales en el rendimiento de la carrera, analizados por el HLM, mostraron que el rendimiento de la carrera de 3000 m disminuyó de manera significativa con el transcurso del tiempo. Entre las mediciones fisiológicas, la V4 y la $v\text{VO}_2\text{máx}$ fueron los parámetros más relacionados con los cambios en el rendimiento. Además, estas variables pueden utilizarse para predecir el rendimiento de la carrera de media distancia, en particular si se utilizan de manera simultánea ($R^2 = 0.85$). El alto poder predictivo de la $v\text{VO}_2\text{máx}$ y la V4 sugiere que ambos, entrenadores y atletas, deberían poner la atención en desarrollar estas dos variables fisiológicas a fin de mejorar el rendimiento de la carrera de 3000 m.

Puntos Clave

- La V4 y la v VO₂máx son las variables fisiológicas más importantes para explicar los cambios longitudinales en el rendimiento de la carrera de 3000 m.
- La predicción del rendimiento de la carrera de 3000 m es mejor si se utilizan ambas, V4 y vVO₂máx, en la misma ecuación: $y = 0.646 + 0.626x + 0.416z$; R²=0.85, donde y es la V de carrera (km·h⁻¹), x es la V4 (km·h⁻¹) y z es la vVO₂máx (km·h⁻¹).
- La V4 y la vVO₂máx se pueden utilizar con fines de control del entrenamiento.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido respaldado por el Programa de Desarrollo Educativo para Portugal (PRODEP III), co-financiado por la Comunidad Europea. Los autores expresan su sincero agradecimiento a todos los participantes y entrenadores que se comprometieron en esta investigación.

REFERENCIAS

1. Acevedo, E.O. and Goldfarb, A.H (1989). Increased training intensity effects on plasma lactate, ventilatory threshold, and endurance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 21(5), 563-568
2. Billat, V., Beillot, J., Jan, J., Rochcongar, P. and Carre, F (1996). Gender effect on the relationship of time limit at 100% VO₂max with other bioenergetic characteristics. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 28(8), 1049-1055
3. Billat, V., Bernard, O., Pinoteau, J., Petit, B. and Koralsztein, J.P (1994). Time to exhaustion at VO₂max and lactate steady state velocity in sub elite long-distance runners. *Archives Internationales de Physiologie, de Biochimie et de Biophysique* 102(3), 215-219
4. Billat, V., Renoux, J.C., Pinoteau, J., Petit, B. and Koralsztein, J.P (1994). Reproducibility of running time to exhaustion at VO₂max in subelite runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 26(2), 254-257
5. Billat, V., Renoux, J.C., Pinoteau, J., Petit, B. and Koralsztein, J.P (1994). Times to exhaustion at 100% of velocity at VO₂max and modelling of the time-limit/velocity relationship in elite long-distance runners. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 69(3), 271-273
6. Billat, V.L (1996). Use of blood lactate measurements for prediction of exercise performance and for control of training (recommendations for long-distance running). *Sports Medicine* 22(3),157-175
7. Brisswalter, J. and Legros, P (1994). Variability in energy cost of run-ning during one training season in high level runners. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 34(2), 135-140
8. Cunningham, L.N (1990). Relationship of running economy, ventilatory threshold, and maximal oxygen consumption to running performance in high school females. *Research Quarterly for Exer-cise and Sport* 61(4), 369-374
9. Daniels, J.T (1974). Running with Jim Ryun: A five -year study. *The Physician and Sportsmedicine* 2, 62-67
10. Prampero, P.E., Atchou, G., Bruckner, J.C. and Moia, C (1986). The energetics of endurance running. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 55(3), 259-266
11. Faude, O., Kindermann, W. and Meyer, T (2009). Lactate threshold concepts: how valid are they?. *Sports Medicine* 39(6), 469-490
12. Grant, S., Craig, I., Wilson, J. and Aitchison, T (1997). The relationship between 3 km running performance and selected physiological variables. *Journal of Sports Sciences* 15(4), 403-410
13. Heck, H., Mader, A., Hess, G., Mucke, S., Muller, R. and Hollmann, W (1985). Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *International Journal of Sports Medicine* 6(3), 117-130
14. Houmard, J.A., Craib, M.W., O'Brien, K.F., Smith, L.L., Israel, R.G. and Wheeler, W.S (1991). Peak running velocity, submaximal energy expenditure, VO₂max, and 8 km distance running performance. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 31(3), 345-350
15. Jones, A.M (1998). A five year physiological case study of an Olympic runner. *British Journal of Sports Medicine* 32(1), 39-43
16. Landis, J. and Koch, G (1977). measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33(1), 159-174
17. Morgan, D.W., Baldini, F.D., Martin, P.E. and Kohrt, W.M (1989). Ten kilometer performance and predicted velocity at VO₂max among well-trained male runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 21(1), 78-83
18. Murase, Y., Kobayashi, K., Kamei, S. and Matsui, H (1981). Longitudinal study of aerobic power in superior junior athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 13(3), 180-184
19. Noakes, T.D (1988). Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a contemporary perspective. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 20(4), 319-330
20. Novo, L. and Santos, P (2002). Predição da performance competitiva nos 5000m/10000 com base no limiar aeróbio-anaeróbio. in: *Investigação aplicada em Atletismo. Editores: Santos P, e Rodrigues dos Santos J. Publicação da FCDEF-UP. 191-194. (In Portugal)*
21. Raudenbush, S., Bryk A, Cheong, Y.F. and Congdon, R (2001). Hierarchical linear and nonlinear modeling. *HLM 5: Lincolnwood,*

IL: Scientific Software International Inc. 315. (In Portugal)

22. Santos, P. and Kruger, J (2002). Controlo do treino em meiofundo e fundo com base no limiar anaeróbio determinado em testes de terreno. in: *Investigação aplicada ao atletismo*. Santos PJM e Santos JAR editores. FCDEF-Porto. 137-147. (In Portugal)
23. Schneiderman, E., Kowalski, C., Willis, S., Ten Have, T. and Furey, A (1993). Longitudinal Data Analysis. *Version 3.1. Release Notes*. (In Portugal)
24. Shephard, R.J (2000). Consumo máximo de oxígeno. IN: *La resistencia en el deporte, cap 19*. Paidotribo 2ª edición. Shephard RJ & As-trand P-O Editores. (In Portugal)
25. Tanaka, K., Matsuura, Y., Matsuzaka, A., Hirakoba, K., Kumagai, S., Sun, S.O. and Asano, K (1984). A longitudinal assessment of anaerobic threshold and distance-running performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 16(3), 278-282
26. Tanaka, K., Watanabe, H., Konishi, Y., Mitsuzono, R., Sumida, S., Tanaka, S., Fukuda, T. and Nakadomo, F (1986). Longitudinal associations between anaerobic threshold and distance running performance. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 55(3), 248-252
27. Yoshida, T., Udo, M., Iwai, K. and Yamaguchi, T (1993). Physiological characteristics related to endurance running performance in female distance runners. *Journal of Sports Sciences* 11(1), 57-62

Cita Original

José A. Bragada, Paulo J. Santos, José A. Maia, Paulo J. Colaço, Vítor P. Lopes and Tiago M. Barbosa. Longitudinal Study in 3,000 m Male Runners: Relationship between Performance and Selected Physiological Parameters. *Journal of Sports Science and Medicine* (2010) 9, 439 - 444