

Monograph

Mayor Precisión de la Frecuencia Cardíaca en Comparación con el VO_2 para Predecir la Intensidad de Ejercicio en Corredores Entrenados en Resistencia

Víctor M Reis, Roland Van den Tillaar y Mario C Marques

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue evaluar la precisión del consumo de oxígeno con regresión de la frecuencia cardíaca durante la carrera en pista en los corredores altamente entrenados. Doce corredores nacionales e internacionales de larga distancia (edad 30.7 ± 5.5 años, altura 1.71 ± 0.04 m y masa 61.2 ± 5.8 kg) con un máximo rendimiento personal en media maratón de $62 \text{ min } 37 \text{ s} \pm 1 \text{ min } 22 \text{ s}$ participaron de este estudio. Cada participante realizó, en una pista sintética apta para todo tipo de clima, cinco series de 6 min a velocidad constante y cada serie a una velocidad de carrera incrementada. La velocidad inicial fue de $3.33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ con un incremento de $0.56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en cada serie posterior. Durante las carreras se midieron el VO_2 y la frecuencia cardíaca e inmediatamente después de cada carrera se evaluó el lactato en sangre. El VO_2 pico promedio y la frecuencia cardíaca pico promedio fueron, respectivamente, $76.2 \pm 9.7 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ y $181 \pm 13 \text{ latidos}\cdot\text{min}^{-1}$. La linealidad de las regresiones entre la frecuencia cardíaca, la velocidad de carrera y el VO_2 fue muy elevada ($r > 0.99$) con pequeños errores de regresión estándar (i.e. $S_{y.x} < 5\%$ a la velocidad asociada con los umbrales de lactato a 2 y 4 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$). Las fuertes relaciones entre la frecuencia cardíaca, la velocidad de carrera y el VO_2 halladas en este estudio muestran que, en los corredores altamente entrenados, es posible considerar la frecuencia cardíaca como un indicador preciso de la demanda de energía y de la velocidad de carrera. Por lo tanto, en esta cohorte de participantes puede no ser necesario utilizar el VO_2 para registrar cambios en la economía de la carrera de los sujetos durante los períodos de entrenamiento.

Palabras Clave: velocidad de carrera, carga interna, relaciones, error estándar

INTRODUCCION

El procedimiento más común para evaluar la demanda de energía durante las actividades físicas es la calorimetría indirecta en base a la medición del consumo de oxígeno (VO_2). No obstante, la mayoría de los profesionales que trabajan en el deporte no cuentan con un fácil acceso a los analizadores de gases, que pueden justificar el intento de validar otras mediciones para estimar la demanda de energía. El uso de la tecnología moderna, como los acelerómetros, intentó superar

dichas dificultades (Schmitz et al., 2005; Fudge et al., 2007). Sin embargo, el costo de los acelerómetros de alta tecnología puede descartar su elección como forma indirecta de estimar la demanda de energía. Además, la validez de estos instrumentos a menudo ha sido cuestionada (Leenders et al., 2003; 2006) y la descripción de alta precisión está limitada a ciertos tipos de ejercicios con poblaciones específicas (Kozey et al., 2010). En estudios con animales, la relación VO_2 /frecuencia cardiaca es muy utilizada para evaluar la demanda de energía durante la locomoción (Brosh, 2007; Halsey et al., 2008), y también se ha investigado en seres humanos (Hiilloskorpi et al., 1999; Garet et al., 2005). La relación VO_2 /frecuencia cardiaca a menudo se utiliza en el campo médico (Mezzani, et al., 2007) o para evaluar la actividad física de los niños (Iannotti et al., 2004), pero con menos frecuencia en el campo del entrenamiento deportivo (Vella y Robergs, 2005).

En la prescripción de ejercicios, además de las estimaciones de la demanda de energía, la medición de la frecuencia cardiaca proporciona una herramienta útil para prescribir la intensidad de los ejercicios y monitorear las adaptaciones del entrenamiento. En este contexto, algunos han intentado brindar pruebas a partir de la relación entre las fracciones de la frecuencia cardiaca de reserva y las fracciones del VO_2 de reserva (Lounana et al., 2007). De hecho, la medición que se utiliza con más frecuencia para controlar la intensidad del ejercicio es la frecuencia cardiaca. Los monitores de frecuencia cardiaca son menos costosos que otros instrumentos y tanto la recopilación como la interpretación de los datos es fácil para la mayoría de los atletas y entrenadores. El potencial de la frecuencia cardiaca para utilizarlo como un indicador válido de la intensidad del ejercicio garantiza poder establecer la relación individual entre el VO_2 y la frecuencia cardiaca, y la precisión de esta técnica depende de la solidez de la línea de regresión. La precisión de la regresión VO_2 /intensidad del ejercicio se describe y acepta muy bien durante la carrera en cinta ergométrica (Reis et al., 2007) o la carrera en pista (Reis et al., 2004). Sin embargo, la literatura presenta menos evidencia para confirmar la solidez de los modelos de regresión entre el VO_2 y la frecuencia cardiaca durante la carrera (Hiilloskorpi et al., 1999).

En los pocos estudios que han abordado la cuestión de la regresión VO_2 /frecuencia cardiaca, se le ha prestado poca atención al error estándar de las regresiones. De hecho, la utilización de los coeficientes de correlación para interpretar la regresión no solo es bastante limitada, sino poco aconsejable. En el entrenamiento deportivo, los entrenadores deben cuantificar la variación (errores absolutos y relativos) que deriva de la utilización de la frecuencia cardiaca como indicador de la intensidad del ejercicio.

A pesar de una gran cantidad de estudios sobre fisiología, presentes en la literatura que aborda la carrera de larga distancia, no se ha hallado ningún estudio que cuantifique la precisión de la línea de regresión VO_2 /frecuencia cardiaca entre los corredores de larga distancia altamente entrenados. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio ha sido evaluar la precisión del VO_2 con regresión de la frecuencia cardiaca durante la carrera en pista realizada por corredores altamente entrenados.

METODOS

Participantes

Doce hombres participaron en este estudio de manera voluntaria, luego de la aprobación médica. Los participantes eran corredores de larga distancia de nivel nacional e internacional (media maratón y maratón), todos participaban de programas sistemáticos de entrenamiento en resistencia. Las edades promedio, años de entrenamiento sistemático, altura y masa corporal eran, respectivamente: 30.7 ± 5.5 años, 16.2 ± 5.2 años, 1.71 ± 0.04 m y 61.2 ± 5.8 kg. El mejor rendimiento de los sujetos de media maratón era de 62 min 37 s \pm 1 min 22 s y su último mejor rendimiento (dentro de un periodo de hasta 6 meses previos al estudio) era de 63 min 19 s \pm 1 min 15 s. Los sujetos dieron su consentimiento informado por escrito para participar en el experimento y todos los procedimientos fueron aprobados por el comité de ética local.

Pruebas

Las pruebas en el campo se llevaron a cabo en una pista sintética de 400m apta para todo tipo de clima. Las pruebas se realizaron con una temperatura que varió entre los 16 y 20 grados Celsius y una humedad de entre el 45 y 55%. A los sujetos se les pidió que se abstuvieran de realizar entrenamiento de alta intensidad durante los tres días previos a la prueba.

Cada sujeto realizó varias series de seis minutos a una velocidad constante. La velocidad de carrera de los sujetos se mantuvo constante por medio de un ciclista que utilizaba una bicicleta equipada con un velocímetro electromagnético y a los sujetos se les indicó que lo siguieran a una distancia prudencial, entre 1 y 1.5 m. La velocidad de carrera inicial fue de

3.33 m·s⁻¹. Cada serie posterior se llevó a cabo con un incremento de velocidad de 0.56 m·s⁻¹. El tiempo de recuperación entre las series fue individual y se basó en las mediciones de frecuencia cardiaca y VO₂ durante la recuperación. A los sujetos se les permitía comenzar una nueva serie cuando, durante un período de un minuto, la frecuencia cardiaca y el VO₂ eran menores de 5 latidos·min⁻¹ y menos de 2 mL·kg⁻¹·min⁻¹ respectivamente, diferentes del valor observado antes del comienzo de la primera serie. La prueba finalizaba cuando el sujeto alcanzaba el agotamiento voluntario. El valor promedio del VO₂ más elevado promediado en 20 s se tomó como el VO₂ pico del sujeto. Durante toda la prueba los gases espirados se recolectaron y se analizaron con un analizador de gases K4b2 (Cosmed, Roma, Italia) y el VO₂ se promedió en intervalos de 20 s. Antes de cada prueba, se llevó a cabo una calibración de referencia del aire del dispositivo utilizando una concentración conocida de gas estándar del 16% de O₂ y el 5% de CO₂. El medidor de flujo también se calibró antes de cada prueba con una jeringa de 3000 mL. La frecuencia cardiaca se registró de manera continua con un dispositivo RS800 (Polar Electro, Finlandia) y se promedió en intervalos de 20 s. El valor promedio de la frecuencia cardiaca más elevada promediada durante 20 s se tomó como la frecuencia cardiaca pico del sujeto. Inmediatamente después de cada serie se tomaron muestras de sangre capilar del lóbulo de la oreja a fin de evaluar la concentración de lactato en sangre utilizando un analizador de lactato Accusport (Boehringer, Mannheim, Alemania). Antes de cada prueba, se realizó una calibración de este dispositivo, utilizando Soluciones Estándar de Lactato YSI 1530 (2.5, 5, 10 y 15 mmol·L⁻¹). La acumulación de lactato en sangre se identificó mediante la interpolación lineal para determinar la velocidad de carrera correspondiente a los umbrales 2 y 4 mmol·L⁻¹ (V₂ y V₄ respectivamente).

Regresiones Lineales

Las series de ejercicios se llevaron a cabo para obtener los puntos de relación VO₂/frecuencia cardiaca que permitían el cálculo de una ecuación de regresión válida. Para cada velocidad, se utilizó el promedio de la frecuencia cardiaca y el promedio del VO₂ durante el último minuto para este propósito y al VO₂ se lo consideró como la variable dependiente. Todos los sujetos realizaron cinco series completas. La mayoría de los sujetos (n = 9) realizó una sexta serie, pero ésta no se incluyó en la regresión, dado que no se pudo alcanzar el estado estable del VO₂ (determinado como una diferencia menor a 2 mL·kg⁻¹·min⁻¹ entre dos minutos consecutivos) o bien no se pudo mantener durante seis minutos. Asimismo, se establecieron regresiones lineales con la velocidad de carrera como variable independiente y el VO₂ o la frecuencia cardiaca como variables dependientes. Un VO₂ de velocidad cero (valor promedio de un minuto registrado antes del comienzo de la prueba sub-máxima) se incluyó en las rectas de regresión VO₂/velocidad mediante un procedimiento no forzado (Reis et al., 2005). En cuanto a la regresión frecuencia cardiaca/velocidad, también se incluyó una frecuencia cardiaca de velocidad cero. Para este propósito se tomó la frecuencia cardiaca promedio de un minuto de los sujetos antes del comienzo de la primera serie (sin ningún ejercicio previo). En las rectas de regresión frecuencia cardiaca/VO₂ también se incluyeron el VO₂ y la frecuencia cardiaca de reposo.

Análisis Estadísticos

Los datos se analizaron con el programa SPSS 14.0 (SPSS Science, Chicago, EUA). La suposición de la normalidad se controló con el test de Shapiro-Wilk. En todos los datos se utilizaron regresiones lineales simples. La dispersión alrededor de la línea de regresión se utilizó como una medida de la aptitud física de las líneas de regresión. La significancia estadística se estableció en $p \leq 0.05$. Los resultados se presentan como medias \pm desviaciones estándar (DE).

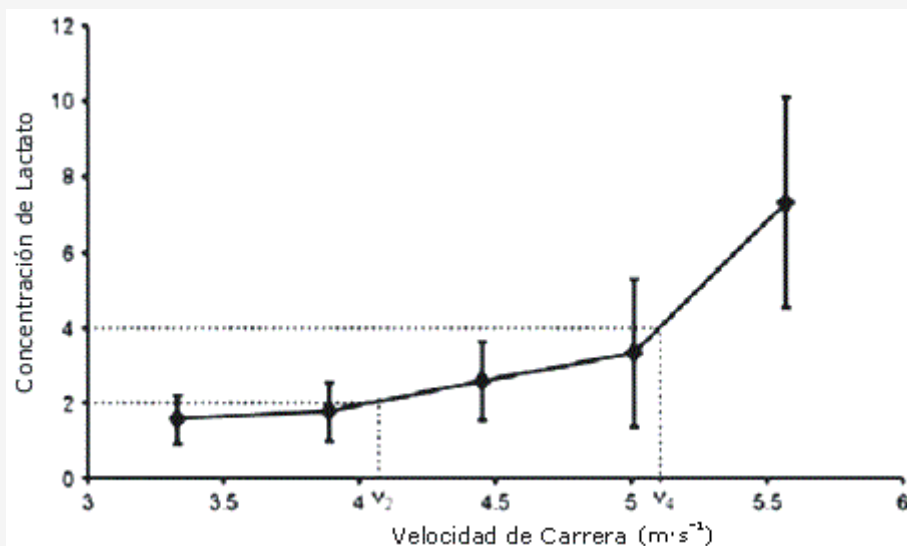


Figura 1. Concentraciones promedio de lactato después de cada serie de carrera. Velocidad a 2 mmol·L⁻¹ y 4 mmol·L⁻¹ expresada como V₂ y V₄

RESULTADOS

El VO₂ pico promedio y la frecuencia cardíaca pico promedio fueron, respectivamente, 76.2 ± 9.7 mL·kg⁻¹·min⁻¹ y 181 ± 13 latidos·min⁻¹. La velocidad promedio al umbral de 2 mmol·L⁻¹ (V₂) fue de 4.04 ± 0.50 m·s⁻¹ y al umbral de 4 mmol·L⁻¹ (V₄) fue de 5.10 ± 0.40 m·s⁻¹. Los sujetos realizaron en promedio dos series de carrera por debajo de la V₂, una tercera serie entre la V₂ y la V₄, una cuarta serie con una intensidad cercana a la V₄ y una quinta serie por encima de la V₄. En la Figura 1 se muestran los valores promedio del lactato en sangre en las cinco series. Las regresiones entre la frecuencia cardíaca, la velocidad de carrera y el VO₂ fueron todas significativas ($p < 0.01$), con una linealidad elevada ($r > 0.99$) y con un pequeño error estándar de regresión ($Sy.x \leq 4.51$), como se ilustra en las Figuras 2, 3 y 4. Estas cantidades muestran el coeficiente de correlación al cuadrado (R²), el error estándar de regresión (Sy.x) y también la ecuación de regresión registrada con los datos promedio de todos los participantes.

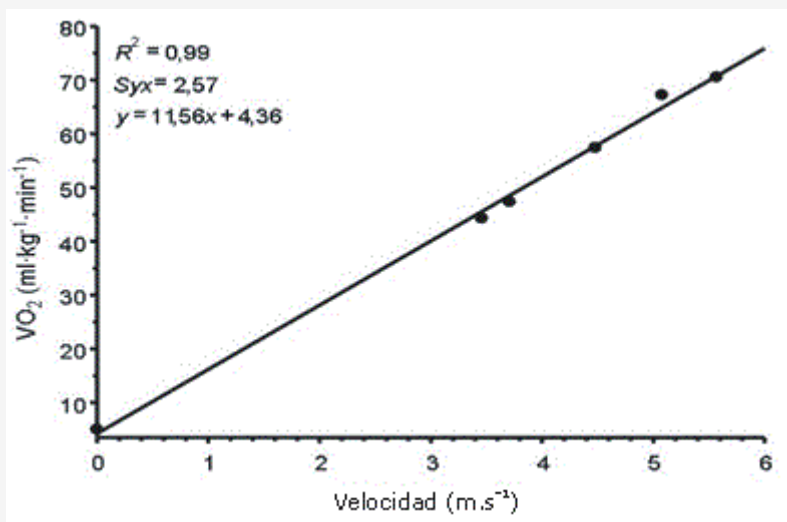


Figura 2. Regresión lineal entre el VO₂ y la velocidad de carrera (n = 12).

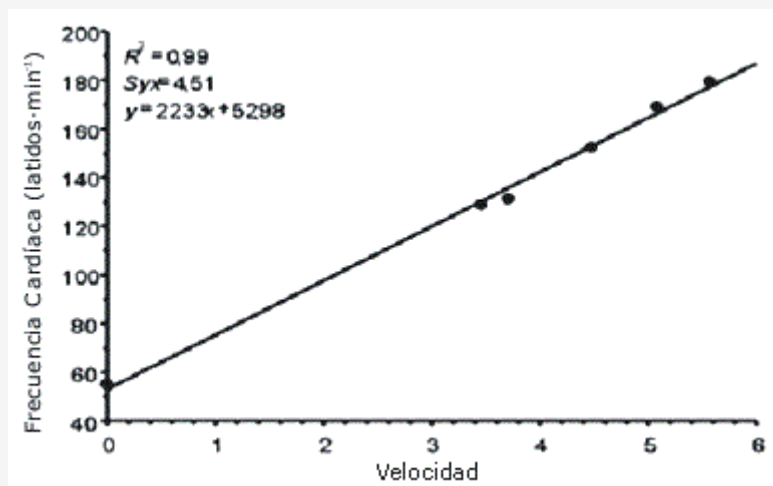


Figura 3. Regresión lineal entre la frecuencia cardíaca y la velocidad de carrera (n = 12).

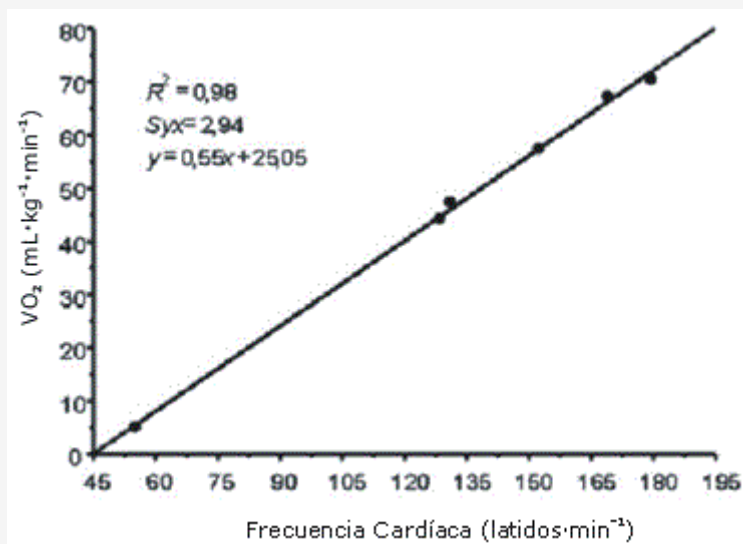


Figura 4. Regresión lineal entre la frecuencia cardíaca y la velocidad de carrera ($n = 12$).

DISCUSION

El objetivo del presente estudio fue evaluar la precisión de la regresión frecuencia cardíaca/consumo de oxígeno durante una carrera en pista realizada por corredores altamente entrenados. Los principales hallazgos han sido que la frecuencia cardíaca guardó una fuerte relación, y con un error estándar bajo, tanto con el consumo de oxígeno como con la velocidad de carrera.

La última serie de ejercicios (6^a) para nueve sujetos se realizó a $6.13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($\sim 22 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). Utilizando la regresión VO_2 /velocidad el VO_2 fue de $75.2 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, que correspondió al VO_2 pico de los sujetos, de $76.1 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Esta velocidad de carrera ($\sim 22 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) debería ser cercana a la velocidad aeróbica máxima de los sujetos y puede sugerir que los atletas alcanzaron un valor de VO_2 pico cercano a su verdadero valor máximo. Esta muestra se aplica a la frecuencia cardíaca pico que se observó. El valor promedio fue de $\sim 10 \text{ latidos}\cdot\text{min}^{-1}$ por debajo del máximo previsto para la edad (220-edad). La frecuencia cardíaca promedio que derivó de la interpolación de la V_2 y la V_4 fue del $\sim 85\%$ y $\sim 91\%$ de la frecuencia cardíaca pico de los sujetos, respectivamente. El VO_2 promedio calculado en los mismos umbrales fue del $\sim 74\%$ y $\sim 81\%$ del VO_2 pico de los sujetos, respectivamente. Por lo tanto, la fracción de la frecuencia cardíaca pico fue del $\sim 10\%$ más elevado que la fracción del VO_2 pico generada en la V_2 y la V_4 , lo que confirma hallazgos previos en ciclistas (Mamen y van den Tillaar, 2009) y corredores (Mamen et al., 2010) entrenados. La velocidad de carrera promedio al umbral de $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (V_4) estuvo dentro de los valores reportados en la literatura para corredores de alto rendimiento entrenados en resistencia (Bragada et al., 2010).

La variación promedio en la regresión VO_2 /velocidad de carrera fue de $2,6 \pm 0,9 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Esta variación representa un error relativo del $\sim 4,6\%$ y $\sim 4,2\%$, teniendo en cuenta el VO_2 observado en la V_2 y la V_4 , respectivamente. La variación en el presente estudio es apenas superior a la reportada para los atletas entrenados en esprint (Reis et al., 2004) y los entrenados en resistencia (Reis et al., 2005), sobre pista y sobre cinta ergométrica horizontal respectivamente. La variación promedio de la regresión frecuencia cardíaca/velocidad de carrera fue de $5 \pm 3 \text{ latidos}\cdot\text{min}^{-1}$. Esta variación representa un error relativo del $\sim 2,95\%$ y $\sim 2,75\%$, teniendo en cuenta la frecuencia cardíaca calculada para la V_2 y la V_4 , respectivamente.

Considerando la frecuencia cardíaca como variable independiente y el VO_2 como dependiente, se investigó en qué medida la frecuencia cardíaca podía reflejar la verdadera demanda de energía (VO_2). El modelo presentó un error de regresión promedio de $2,9 \pm 1,0 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. En la V_2 y la V_4 , la frecuencia cardíaca predijo el VO_2 con un error relativo del $\sim 5\%$ y $\sim 4,5\%$, respectivamente. Los presentes resultados se contradicen con los que reportaron Vella y Robergs (2005) con sujetos entrenados en resistencia durante el pedaleo. La literatura presenta evidencia sobre la no linealidad de la relación VO_2 /frecuencia cardíaca en intensidades de ejercicio muy bajas o muy elevadas (para referencias ver Achten y Jeukendrup, 2003). Los presentes resultados indican que en los corredores de resistencia altamente entrenados es posible observar la

linealidad hasta intensidades de ejercicios tan elevadas como el 90% del VO_2 pico. La elevada linealidad puede deberse en parte al hecho de que los factores, que en general explican las desviaciones de la linealidad (para referencias ver Achten y Jeukendrup, 2003), pueden ser inexistentes o insignificantes en este tipo de población. Otra cuestión que puede ayudar a explicar la elevada linealidad en estos sujetos es el hecho de que en las regresiones sólo se incluyó el estado estable del VO_2 con series de una duración de 6 minutos. De hecho, se ha demostrado que las rápidas transiciones entre las intensidades (series de ejercicios de corta duración) explican la no linealidad de la relación VO_2 /frecuencia cardiaca (Jeukendrup et al., 1997; Vachon et al., 1999).

El rango de intensidades evaluado en el presente estudio cubre la mayoría de las que comúnmente se utilizan en el proceso de entrenamiento de los corredores de media y larga distancia. De hecho, desde un punto de vista práctico, la V_2 y la V_4 representan las intensidades de ejercicios que en general se utilizan para prescribir el entrenamiento de resistencia y por esa razón este análisis se enfoca en esos umbrales. Los resultados del presente estudio muestran que, en los corredores altamente entrenados, es posible utilizar la frecuencia cardiaca como un indicador preciso de la carga externa en las velocidades de carrera sub-máximas. Por lo tanto, la necesidad de evaluar la respuesta del VO_2 de los sujetos al ejercicio puede no ser importante para el propósito de la prescripción de los ejercicios.

CONCLUSION

Las fuertes relaciones entre la frecuencia cardiaca, la velocidad de carrera y el VO_2 halladas en este estudio muestran que, en los corredores altamente entrenados, es posible considerar la frecuencia cardiaca como un indicador preciso de la demanda de energía y de la velocidad de carrera. Por lo tanto, en esta cohorte de participantes puede resultar innecesario utilizar el VO_2 para registrar los cambios en la economía de carrera de los sujetos durante los períodos de entrenamiento.

Puntos Clave

- La frecuencia cardiaca se utiliza en el control de la intensidad de los ejercicios en los deportes de resistencia.
- No obstante, pocos estudios han cuantificado la precisión de su relación con el consumo de oxígeno en los corredores altamente entrenados.
- Se han evaluado a doce corredores de elite de media maratón durante la carrera en pista a varias intensidades y se han establecido tres regresiones: consumo de oxígeno/frecuencia cardiaca; frecuencia cardiaca/velocidad de carrera y consumo de oxígeno/velocidad de carrera.
- Las tres regresiones presentaron, respectivamente, una imprecisión del 4,2%, 2,75% y 4,5% a la velocidad asociada con el umbral de $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Los resultados del presente estudio demuestran que, en los corredores altamente entrenados, es posible utilizar la frecuencia cardiaca como un indicador preciso del índice de trabajo externo en las velocidades de carrera sub-máximas.

REFERENCIAS

1. Achten, J. and Jeukendrup, A (2003). Heart rate monitoring: applications and limitations. *Sports Medicine* 33, 517-538
2. Brosh A (2007). Heart rate measurements as an index of energy expenditure and energy balance in ruminants: a review. *Journal of Animal Science* 85, 1213-1227
3. Fudge, B.W., Wilson, J., Easton, C., Irwin, L., Clark, J., Haddow, O., Kayser, B. and Pitsiladis, Y.P (2007). Estimation of oxygen uptake during fast running using accelerometry and heart rate. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 39, 192-198
4. Garet, M., Boudet, G., Montaurier, C., Vermorel, M., Coudert, J. and Chamoux, A (2005). Estimating relative physical workload using heart rate monitoring: a validation by whole-body indirect calorimetry. *European Journal of Applied Physiology* 94, 46-53
5. Halsey, L.G., Shepard, E.L., Hulston, C.J., Venables, M.C., White, C.R., Jeukendrup, A.E. and Wilson, R.P (2008). Acceleration versus heart rate for estimating energy expenditure and speed during locomotion in animals: tests with an easy model species, *Homo sapiens*. *Zoology (Jena)* 111, 231-241
6. Iannotti, R.J., Claytor, R.P., Horn, T.S. and Chen, R (2004). Heart rate monitoring as a measure of physical activity in children. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 36, 1964-1971.
7. Jeukendrup, A.E., Hesselink, M.K., Kuipers, H. and Keizer, H.A (1997). The Conconi test. *International Journal of Sports Medicine* 18, 393-396

8. Kozey, S.L., Lyden, K., Howe, C.A., Staudenmayer, J.W. and Freedson, P.S (2010). Accelerometer output and MET values of common physical activities. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 42(9), 1776-1784
9. Leenders, N.Y., Nelson, T.E. and Sherman, W.M (2003). Ability of different physical activity monitors to detect movement during treadmill walking. *International Journal of Sports Medicine* 24, 43-50
10. Leenders, N.Y., Sherman, W.M. and Nagaraja, HN (2006). Energy Expenditure Estimated by Accelerometry and Doubly La-beled Water: Do They Agree?. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 38, 2165-2172
11. Lounana, J., Campion, F., Noakes, T.D. and Medelli, J (2007). Relation-ship between %HRmax, %HR reserve, %VO2max, and %VO2 reserve in elite cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 39, 350-357
12. Mamen, A., Costas Lapidis, C. and van den Tillaar R (2010). Precision in estimating Maximal Lactate Steady State performance in running using a fixed blood lactate concentration or a delta value from an incremental lactate profile test. *International Journal of Applied Sports Science (In press)*
13. Mamen, A. and van den Tillaar, R (2009). Using the Lactate Pro® for lactate threshold determinations in cycling. *International Journal of Applied Sports Science* 21, 74-85
14. Schmitz, K.H., Treuth, M., Hannan, P., McMurray, R., Ring, K.B., Catellier, D. and Pate, R (2005). Predicting energy expenditure from accelerometry counts in adolescent girls. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 37, 155-161
15. Vachon, J.A., Basset Jr, D.R. and Clarke, S (1999). Validity of the heart rate deflection point as a predictor of lactate threshold during running. *Journal of Applied Physiology* 87, 452-459
16. Vella, C.A. and Robergs, R.A (2005). Non-linear relationships between central cardiovascular variables and VO2 during incremental cycling exercise in endurance-trained individuals. *Journal of Sports Medicine & Physical Fitness* 45, 452-459

Cita Original

Victor M. Reis, Roland Van den Tillaar and Mario C. Marques. Higher Precision of Heart Rate Compared with VO2 to Predict Exercise Intensity in Endurance-Trained Runners. *Journal of Sports Science and Medicine* (2011) 10, 164 - 168