

Article

Supervisión de las Adaptaciones al Entrenamiento con un Test de Carrera Submáximo en Condiciones de Campo

Ville Vesterinen¹, Ari Nummela¹, Sami Äyrämö², Tanja Laine¹, Esa Hynynen¹, Jussi Mikkola¹ y Keijo Häkkinen³

¹KIHU - Research Institute for Olympic Sports, Jyväskylä, Finland

²Agora Center, University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland

³Department of Biology of Physical Activity, University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland

RESUMEN

El monitoreo regular de las adaptaciones al entrenamiento es importante para optimizar la carga y la recuperación del entrenamiento, que son los principales factores para un entrenamiento exitoso. Objetivo: El objetivo de este estudio fue investigar la utilidad de un nuevo test de carrera submáximo en condiciones de campo para predecir y realizar un seguimiento de los cambios en el rendimiento de resistencia. Métodos: Treinta y cinco varones y mujeres entrenados en resistencia (de edades entre 20 y 55 años) realizaron un programa de entrenamiento de resistencia de 18 semanas. En las semanas 0, 9 y 18 se realizó un test de carrera incremental máximo para la determinación del consumo de oxígeno máximo (VO₂max) y la velocidad de carrera (RS) en el punto de agotamiento (RS_{max}) y en los umbrales de lactato (LT). Además, los sujetos realizaron semanalmente un test de carrera submáximo con tres etapas (SRT), que incluyó una determinación post ejercicio de la recuperación de la frecuencia cardíaca (HRR). Los sujetos fueron agrupados retrospectivamente en cuatro agrupamientos en función de los cambios en los resultados de SRT. Resultados: Se observaron correlaciones grandes ($r=0,60-0,89$) entre las velocidades de carrera (RS) durante todas las etapas del SRT, y todas las variables de rendimiento de resistencia (VO₂max, RS_{max}, RS en LT2 y RS en LT1). La recuperación de la frecuencia cardíaca (HRR) sólo se correlacionó con VO₂max ($r=0,46$). Además se observaron elevadas relaciones entre los cambios en RS durante las etapas a 80 % y 90 % de HR_{max} del test de carrera submáximo en tres etapas (SRT) y un cambio de RS_{max} ($r=0,57$, $r=0,79$). Por otra parte, el análisis de agrupamientos reveló las diferentes tendencias en RS durante las etapas de 80 % y 90 % de HR_{max} durante el entrenamiento entre los agrupamientos, lo que evidenció diferentes aumentos en VO₂max y RS_{max}. Conclusiones: El test submáximo presentó un gran potencial como herramienta práctica para al monitoreo regular de las adaptaciones individuales al entrenamiento de resistencia sin necesidad de recurrir a tests de laboratorio costosos y que insumen mucho tiempo.

Palabras Clave: Carreras de resistencia, entrenamiento, adaptación individual, SRT, estimación del rendimiento

INTRODUCCION

El factor crucial en el entrenamiento exitoso es el equilibrio óptimo entre la carga de entrenamiento y la recuperación. Si el estímulo de entrenamiento es demasiado fácil o demasiado exigente en relación a la recuperación, el entrenamiento puede provocar adaptaciones indeseables. Además, se ha observado ampliamente que los individuos se adaptan de manera diferente a la carga de entrenamiento (1-3). Por ejemplo, el monitoreo semanal regular de los cambios en el rendimiento de resistencia durante el entrenamiento es importante para optimizar la carga y la recuperación del entrenamiento. Sin embargo, es poco factible realizar el monitoreo regular a través de test máximos de laboratorio debido a que es poco práctico, costoso e interfiere con los hábitos de entrenamiento normales.

Se ha observado que la disminución en la frecuencia cardíaca (HR) con el ejercicio submáximo estaría relacionada con una adaptación positiva al entrenamiento (4-6). Así la HR de ejercicios submáximos podría ser un método eficaz para evaluar la actividad autonómica cardíaca, y realizar un seguimiento de los cambios en la velocidad de carrera máxima aeróbica (4). Lamberts et al. (7) desarrollaron una prueba de ciclismo submáxima para supervisar la fatiga y predecir el rendimiento en ciclismo.

Los autores observaron que la potencia de ciclismo en niveles estandarizados submáximos de HR y la recuperación de la frecuencia cardíaca post ejercicio (HRR), podían predecir el rendimiento máximo de ciclismo (7-9) pero no se sabe si el test submáximo puede reflejar los cambios en el rendimiento de resistencia durante un período de entrenamiento. En un estudio previo, nosotros observamos que el índice HR/velocidad de carrera (RS), calculado a partir de todos los ejercicios de carreras con velocidad constante, podía ser utilizado como herramienta potencial para supervisar diariamente las adaptaciones al entrenamiento (10).

Sin embargo se han establecido muchos factores (i.e., factores medioambientales, duración e intensidad del ejercicio) que pueden tener influencia en la respuesta de HR, y por lo tanto pueden alterar la relación entre HR y RS (11,12). La relación HR-RS puede aportar información más certera sobre el estado de entrenamiento, si se estandarizan la duración y la intensidad del ejercicio.

Además de la HR del ejercicio, la HRR post ejercicio refleja la actividad autonómica cardíaca que se ha sugerido que sería un importante determinante de adaptación al entrenamiento de resistencia (4, 6, 8, 13). Se ha propuesto que la medición de la HRR post ejercicio tendría potencial para supervisar la fatiga y predecir los cambios en los parámetros del rendimiento de resistencia (4, 8, 13). Sin embargo en estudios previos los tests submáximos y HRR han sido realizados principalmente en condiciones de laboratorio. Existe muy poca información sobre la posibilidad de utilizar estos tests como herramientas de monitoreo en condiciones al aire libre. Por consiguiente, el objetivo de este estudio fue investigar si era posible utilizar un nuevo test de carrera submáximo en condiciones de campo al aire libre para 1) predecir el rendimiento de carrera y 2) monitorear los cambios en el rendimiento de resistencia durante el entrenamiento. Sobre la base de estudios previos (4, 13, 14) planteamos la hipótesis de que, velocidades de carrera en niveles estandarizados de HR y HRR post ejercicio, podían predecir el rendimiento de resistencia y monitorear la adaptación al entrenamiento de resistencia (4, 5).

METODOS

Sujetos

Cuarenta corredores de resistencia recreativos (20 mujeres y 20 varones) participaron en el estudio. Los sujetos eran saludables y habían estado entrenando al menos tres veces por semana durante los últimos 6 meses.

Las características generales de los sujetos se presentan en la Tabla 1. Después de recibir toda la información sobre el diseño del estudio y de los posibles riesgos, todos los sujetos completaron un documento de consentimiento informado. El estudio fue aceptado por el Comité de Ética de la Universidad de Jyväskylä, Finlandia.

Tabla 1. Características generales de los sujetos (Media±SD). % de Grasa Corporal obtenido por la suma de cuatro pliegues cutáneos; VO₂max= Consumo de oxígeno máximo; Cantidad de entrenamiento y kilometraje de carreras durante los dos meses previos a la realización del estudio

| | Mujeres (n=20) | Varones (n = 20) |
|--|-------------------|---------------------|
| Edad (años) | 35±10 | 35±6 |
| Talla (m) | 166±7 | 175±6 |
| Peso (kg) | 60,3±7,3 | 77,3±8,0 |
| % de Grasa Corporal | 23,7±4,4 | 15,2±4,5 |
| VO _{2max} (ml/kg/min) | 47±5 | 53±5 |
| Antecedentes de entrenamiento regular (años) | 14±8 | 14±8 |
| Entrenamiento veces/semana | 5,6±1,7 | 4,4±2,0 |
| Carrera km/semana | 38±19 | 27±15 |

Diseño y entrenamiento

El entrenamiento consistió en un período de entrenamiento de resistencia de baja intensidad de 8 semanas seguido por un período de entrenamiento de alta intensidad de 8 semanas. Se realizaron tests de carrera máximos e incrementales en cinta rodante antes y después de ambos períodos de entrenamiento (en las semanas 0, 9 y 18). Por otra parte, los sujetos realizaron semanalmente un test de carrera submáximo (SRT) en una pista al aire libre. Todas las evaluaciones fueron realizadas aproximadamente en el mismo momento del día (dentro de 2 horas).

Se solicitó a los sujetos que entrenaran a baja intensidad (por debajo del primer umbral de lactato, LT1) y que mantuvieran el mismo volumen de entrenamiento (media: 5,2±1,9 veces por semana) antes del estudio durante las primeras ocho semanas. Después de esto, se incrementó el volumen y la intensidad del entrenamiento de carrera durante las siguientes ocho semanas. El entrenamiento fue periodizado de manera que tres semanas de entrenamiento de alta intensidad fueran seguidas por una semana de entrenamiento fácil. Los sujetos realizaron sesiones de entrenamiento intervalado moderado 1-3 (30-40min, intensidad entre los umbrales del lactato (LT) 1 y 2), sesiones de alta intensidad (4x4 min con 4 min de recuperación o 6 x 2 min con 2 min de recuperación) o sesiones con velocidad constante (20 min) con intensidad por encima del LT2 por semana de alta intensidad. El entrenamiento de la resistencia consistió principalmente en carrera pero ocasionalmente también incluyó ciclismo, caminata Nórdica y/o esquí a campo traviesa. Los sujetos fueron familiarizados con el uso de un monitor de frecuencia cardíaca Garmin FR 610 (Garmin S.A., Schaffhausen, Suiza) y controlaron su intensidad de entrenamiento midiendo su HR durante todos los ejercicios. Por otra parte, las sesiones de entrenamiento de intensidad moderada y alta fueron supervisadas.

Test de carrera máxima incremental en cinta rodante

Se solicitó a los sujetos que no realizaran ninguna actividad física vigorosa dos días antes del test incremental máximo en cinta rodante. Los sujetos realizaron el test de carrera para la determinación del consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}), la velocidad de carrera máxima en cinta rodante (RS_{max}), LT2 y LT1 tal como se describió en el estudio de Vesterinen et al. (3). El test comenzó a 7 km/h para las mujeres y 8 km/h para los varones y luego se incrementó 1 km/h cada tres minutos hasta el agotamiento volitivo. La pendiente se mantuvo en 0,5 grados durante todo el test. La frecuencia cardíaca (HR) se registró continuamente con un monitor de frecuencia cardíaca (*Suunto t6*, *Suunto S.A., Vantaa, Finlandia*). El consumo de oxígeno respiración por respiración se midió a lo largo del test con un analizador de gases portátil (*Oxycon Mobile, Viasys Health Care, Würzburg, Alemania*). Se obtuvieron muestras de sangre (20µL) de la yema de los dedos al final de cada carga para analizar las concentraciones de lactato sanguíneo (La) (*Biosen S_line Lab+ lactate analyzer, EKF Diagnostic, Magdeburg, Alemania*). El rendimiento de resistencia máximo se determinó como la velocidad de carrera máxima (RS_{max}) hasta el agotamiento. Si el sujeto no lograba completar los 3 min completos de la última velocidad, la RS_{max} se calculaba de la siguiente manera: velocidad de la última etapa completada (km/h) + (tiempo de carrera (s) de la velocidad hasta el agotamiento - 30s)/(180-30s) *1 km/h. En el estudio presente la RS_{max} se utilizó como variable principal para describir la adaptación al entrenamiento de resistencia durante el período de entrenamiento.

Test de carrera submáximo (SRT)

El test de carrera submáximo (SRT) se modificó del Test de Ciclismo Submáximo de Lamberts y Lambert (7). El SRT se realizó con un protocolo de entrada en calor estandarizada para que las sesiones de entrenamiento de intensidad moderada o alta tuvieran lugar después de por lo menos un día de entrenamiento fácil. Se les solicitó que realizaran SRT una vez por semana en el mismo circuito al aire libre. El test SRT de 16 minutos consistió en tres etapas (Figura 1). Se

solicitó a los sujetos que fijaran su velocidad de carrera (RS) según la HR que correspondiera a 70 % (RS1), 80 % (RS2) y 90 % (RS3) de la frecuencia cardíaca máxima (HRmax) de los sujetos durante 6, 6 y 3 minutos, usando monitores de frecuencia cardíaca Garmin FR 610 con sistema de posicionamiento global (GPS) (Garmin S.A., Schaffhausen, Suiza). Las HR blanco fueron calculadas en base a la HRmax del test incremental máximo en cinta rodante en la semana 0. Se estimó el índice de esfuerzo percibido mediante la escala de Borg de 0-10 después de la última etapa. Se registraron los valores de frecuencia cardíaca (HR) y velocidad de carrera (RS) durante test pero los datos del primer minuto de cada etapa fueron excluidos de los análisis debido al establecimiento de RS para alcanzar la HR blanco. Por lo tanto, los promedios de RS y HR fueron calculados durante un período de cinco minutos (1:00-6:00 y 7:00-12:00) para las etapas 1 y 2, y durante un período de dos minutos (13:00-15:00) para la etapa 3. Después de completar el test de carrera, se solicitó a los sujetos que se mantuvieran de pie sin moverse ni hablar durante 1 minuto. Se les solicitó que respiraran normalmente, sin controlar la frecuencia respiratoria. La recuperación de la frecuencia cardíaca (HRR) se calculó restando el valor de la frecuencia cardíaca después de 60s de recuperación del valor de frecuencia cardíaca al final de la tercera etapa.

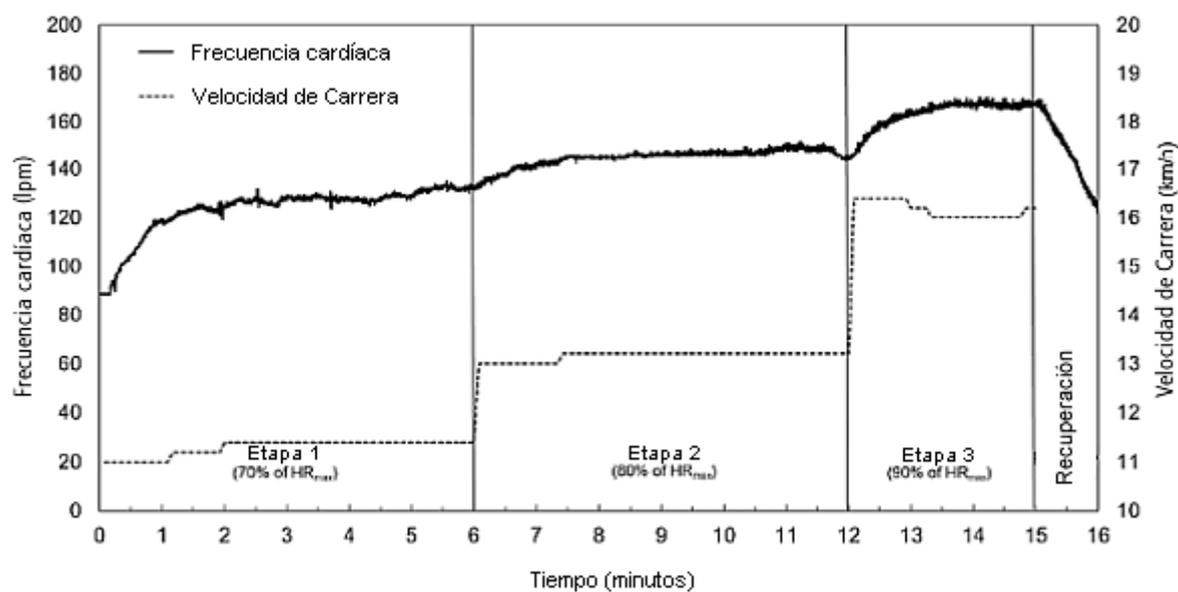


Figura 1. Ejemplo del test de nivel de entrenamiento obtenido de un sujeto elegido arbitrariamente donde se puede observar la frecuencia cardíaca y la velocidad de carrera durante el test de carrera submáximo.

Análisis estadístico

Los resultados se expresan en forma de media \pm desviación estándar (SD). Como el objetivo del presente estudio fue investigar utilidad de SRT para monitorear la adaptación individual al entrenamiento, los sujetos fueron agrupados retrospectivamente en cuatro agrupamientos según los cambios en los resultados del test de carrera submáximo. Debido a la presencia de datos faltantes (debido a enfermedad, lesiones moderadas o datos deficientes de HR) en las series de tiempo de RS1, RS2, RS3 y HRR, en el análisis de agrupamiento se utilizó una variante (MATLAB R2013a) del método de agrupamiento clásico *k*-media (16) en el cual los datos faltantes se manejan usando la estrategia de casos disponibles (17). En (18) es posible encontrar una descripción algorítmica detallada del método *k* media para los datos incompletos. Para evitar modelos de agrupamiento óptimos locales, se generaron 1000 modelos de agrupamiento para cada conjunto de series de tiempo utilizando reinicios aleatorios y aquellos que tuvieran la menor suma de cuadrados de los errores del agrupamiento fueron seleccionados para el análisis posterior. Las diferencias de cambios en la el test de carrera máxima entre los agrupamientos se analizaron mediante el test de Kruskal Wallis, y luego por el método *post hoc* de Dunn-Bonferroni, debido al pequeño número de sujetos en los agrupamientos. El coeficiente de correlación momento producto de Pearson se utilizó para determinar las relaciones entre los valores absolutos de SRT y las variables de rendimiento de resistencia en la semana 9, así como los cambios en SRT y las adaptaciones al entrenamiento de resistencia después de 18 semanas de entrenamiento. Además de las mediciones de significancia estadística, se adoptó el siguiente criterio para interpretar la magnitud de la correlación entre las variables de medición: <0,1 (trivial), 0,1-0,3 (pequeña), 0,3-0,5 (moderada), 0,5-0,7 (grande), 0,7-0,9 (muy grande) y 0,9-1,0 (casi perfecta) (19). La significancia estadística se fijó en

$p < 0,05$. Los análisis estadísticos fueron realizados con el software SPSS (IBM SPSS Statistics 20, IBM, Nueva York, EE.UU.).

RESULTADOS

Entrenamiento

Cinco de los 40 sujetos no completaron el estudio debido a lesiones ($n=4$) y a falta de motivación ($n=1$). El volumen de entrenamiento fue similar durante los dos períodos de entrenamiento ($7,1 \pm 2,6$ h/semana vs. $6,4 \pm 2,0$ h/semana, $5,9 \pm 2,1$ sesiones/semana vs. $6,0 \pm 2,1$ sesiones/semana). El volumen de carrera aumentó en el segundo período de entrenamiento de 33 ± 17 km/sem a 41 ± 16 km/sem ($P < 0,001$). Además, la cantidad porcentual de entrenamiento de alta intensidad aumentó de $1 \pm 2\%$ a $4 \pm 3\%$ ($P < 0,001$), mientras que la cantidad de entrenamiento de intensidad baja ($86 \pm 9\%$ vs. $84 \pm 9\%$) y de intensidad moderada ($13 \pm 8\%$ vs. $12 \pm 9\%$) se mantuvo sin cambio entre los períodos de entrenamiento.

Test de carrera submáximo

Los sujetos no pudieron realizar el test de carrera submáximo (SRT) en todas las semanas debido a enfermedad o a lesiones leves. Además, los resultados de algunos tests no pudieron ser incorporados en el análisis debido a una señal de HR deficiente. En promedio, repitieron el test de carrera submáximo (SRT) 13 veces durante 18 semanas. Los porcentajes de valores faltantes en las series de tiempo de RS1, RS2, RS3 y HRR fueron 23,1%, 23,9%, 24,5% y 24,9%. Los sujetos pudieron regular estrechamente la HR al valor de HR blanco ajustando sus velocidades de carrera (RS) siguiendo el GPS del monitor de frecuencia cardíaca. Las HR medias de la tres etapas fueron $71 \pm 3\%$, $81 \pm 1\%$ y $90 \pm 1\%$ de HRmax.

Los intervalos de medias individuales fueron 69-75 % de HRmax durante la primera etapa, 77-84 % durante la segunda y 87-92 % de durante la tercera etapa de SRT. El índice de esfuerzo percibido (RPE) medio después de SRT fue 5 ± 2 durante el período de entrenamiento.

Estimadores de rendimiento de resistencia

Las correlaciones entre los resultados de SRT y las variables de rendimiento de resistencia se presentan en la Tabla 2. Los análisis de correlación entre las velocidades de carrera (RS) en todas las etapas de SRT revelaron correlaciones muy grandes con VO2max, RSmax, RS en LT2 y RS en LT1, pero la HRR sólo se correlacionó con VO2max. No se observaron diferencias entre los sexos en las correlaciones, excepto para la recuperación de la frecuencia cardíaca (HRR) que se correlacionó con VO2max y RSmax en las mujeres ($r=0,66$, $P=0,003$, $r=0,63$, $P=0,005$), pero no en los varones. Se observó una tendencia similar entre HRR y VO2max ($r = 0,56$, $P = 0,073$) en los varones.

Tabla 2. Correlación entre los resultados del test de carrera submáximo (SRT) y las variables de rendimiento de resistencia ($n=29$).

Correlación de Pearson: * $P < 0,05$ *** $P < 0,001$. a correlación muy grande, b correlación grande, c correlación moderada. VO2max=

Consumo de oxígeno máximo; RSmax= Velocidad de carrera máxima en el test máximo en cinta rodante; RS en LT2= Velocidad de carrera en el segundo umbral de lactato; RS en LT1= Velocidad de carrera en el primer umbral de lactato; RS= Velocidad de carrera;

HRR= Recuperación de la frecuencia cardíaca

| | VO2max (mL/kg/min) | RSmax (km/h) | RS en LT2 (km/h) | RS en LT1 (km/h) |
|-------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| RS Etapa 1 (km/h) | 0,60****b | 0,74****,a | 0,83****,a | 0,87****,a |
| RS Etapa 2 (km/h) | 0,75****,a | 0,83****,a | 0,89****,a | 0,83****,a |
| RS Etapa 3 (km/h) | 0,58****,b | 0,79****,a | 0,78****,a | 0,71****,a |
| HRR (bpm) | 0,46** ^o | 0,22 | 0,31 | 0,22 |

Relaciones entre los cambios en el test de carrera submáximo y la adaptación al entrenamiento

Todas las variables de rendimiento de resistencia mejoraron durante el período de entrenamiento. VO2max, RSmax, RS en LT2 y LT1 aumentaron $2,2 \pm 6,2\%$ ($P = 0,043$), $3,2 \pm 4,0\%$ ($P < 0,001$), $5,7 \pm 4,6\%$ ($P < 0,001$) y $6,5 \pm 5,4\%$ ($P < 0,001$)

respectivamente. Las relaciones entre los cambios de variables en SRT y los cambios en las variables de rendimiento de resistencia después de 18 semanas de entrenamiento se presentan en la Tabla 3 y la Figura 2. Los cambios en RS2 y RS3 de SRT se correlacionaron significativamente con el cambio en VO2max, RSmax y RS en los umbrales del lactato. No se observó ninguna diferencia entre los sexos en las correlaciones.

Tabla 3. Correlación entre los cambios en las variables de rendimiento de resistencia y los cambios en el test submáximo de carrera (SRT), (n=26) después de 18 semanas de entrenamiento. Correlación de Pearson: * P < 0,05 *** P < 0,001. a correlación muy grande, b correlación grande, c correlación moderada. VO2max= Consumo de oxígeno máximo; RSmax= Velocidad de carrera máxima en el test máximo en cinta rodante; RS en LT2= Velocidad de carrera en el segundo umbral de lactato ; RS en LT1= Velocidad de carrera en el primer umbral de lactato ; RS= Velocidad de carrera; HRR= Recuperación de la frecuencia cardíaca

| | VO2max (%) | RSmax (%) | RS en LT2 (%) | RS en LT1 (%) |
|----------------|------------|-----------|---------------|---------------|
| RS Etapa 1 (%) | 0,34 | 0,24 | 0,27 | 0,34 |
| RS Etapa 2 (%) | 0,60***b | 0,57***b | 0,43* | 0,48* |
| RS Etapa 3 (%) | 0,62***b | 0,79***a | 0,74***a | 0,52***b |
| HRR (%) | 0,13 | -0,01 | 0,21 | 0,37 |

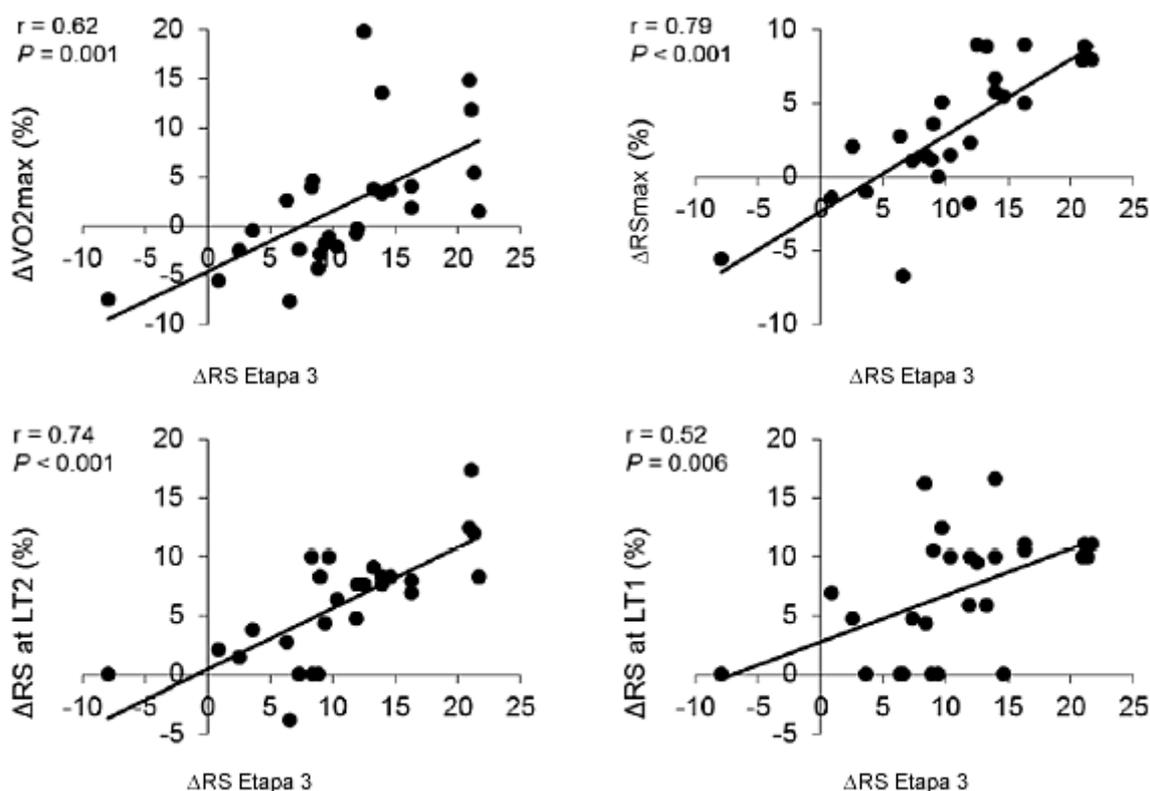


Figura 2. Correlaciones entre los cambios en las variables de rendimiento de resistencia y los cambios en la velocidad de carrera durante la tercera etapa del test de carrera submáximo (SRT, n = 26) después de 18 semanas de entrenamiento. VO2max= Consumo de oxígeno máximo, RSmax= Velocidad de carrera máxima en el test máximo en cinta rodante; RS en LT2, velocidad de carrera en el segundo umbral de lactato; RS en LT1= Velocidad de carrera en el primer umbral de lactato; RS Etapa 3= Velocidad de carrera a 90% de HRmax en el test de carrera submáximo.

La evolución en el tiempo de los cambios en las velocidades de carrera (RS) del test de carrera submáximo (SRT) para los grupos se presenta en la Figura 3. Los agrupamientos basados en el cambio en RS2 presentaron diferencias entre los

agrupamientos en el cambio de VO₂max (P = 0,038) y RSmax (P=0,008). El agrupamiento 1, que mostró el mayor aumento en RS2, presentó un aumento mayor en RSmax en comparación con los agrupamientos 2 y 3 (P=0,004). Los agrupamientos agrupados por el cambio en RS3 también presentaron diferencias en el cambio de VO₂max (P=0,009) y RSmax (P = 0,004) y RS en LT2 (P=0,042). Los agrupamientos 1 y 2 presentaron mejoras significativamente mayores en RSmax en comparación con los agrupamientos 3 y 4. Los agrupamientos formados por los cambios de RS1, HRR y RPE, no presentaron ninguna diferencia en el cambio de ninguna variable de rendimiento de resistencia.

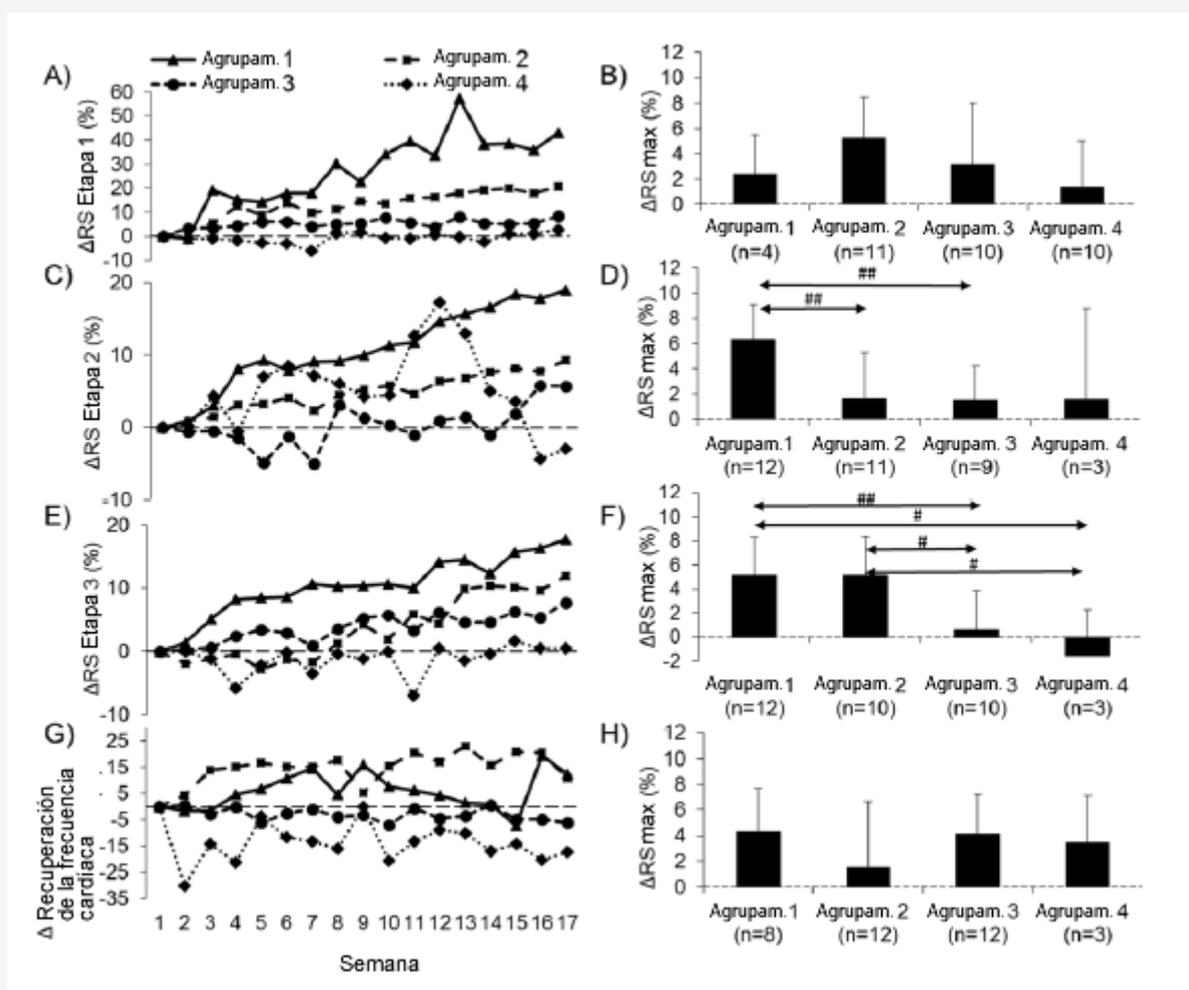


Figura 3. Evolución en el tiempo representativa de los agrupamientos en función de los cambios en la velocidad de carrera en la primera (A), segunda (C), tercera (E) etapas y recuperación de la frecuencia cardíaca (G), y cambios en la velocidad de carrera máxima en el test máximo en cinta rodante (RSmax) para los agrupamientos basados en los cambios de RS1 (B), RS2 (D), RS3 (F) y HRR (H). Diferencias entre los agrupamientos en el cambio en RSmax: #p < 0,05, ##p < 0,01 (revelados por el test de Kruskal-Wallis).

DISCUSIÓN

El hallazgo principal del presente estudio describe las relaciones entre los cambios de RS durante la segunda y tercera etapas de SRT, y el cambio en las variables de rendimiento después del período de entrenamiento. Además, el análisis de agrupamientos reveló diferentes tendencias en la velocidad de carrera (RS) de la segunda y tercera etapas entre los agrupamientos, y también se observaron diferencias en el aumento de VO₂max y RSmax después del período de entrenamiento de 18 semanas.

Durante el SRT los sujetos regularon exitosamente por si mismos la velocidad de carrera para alcanzar el nivel de frecuencia cardíaca fijado en las condiciones al aire libre. La intensidad de la tercera etapa (90 % de HRmax) sería la más razonable para la regulación exacta de la frecuencia cardíaca según el pequeño rango individual de frecuencia cardíaca.

Estos resultados coinciden con los resultados de estudios anteriores relacionados a tests de carrera submáximos (20, 21). El SRT fue diseñado como protocolo de entrada en calor estandarizado para las principales sesiones de entrenamiento, sin interferir con el entrenamiento normal. Aunque no todos los sujetos lograron realizar el SRT en todas las semanas durante el período de entrenamiento, debido a enfermedad o a lesiones leves, pudieron repetirlo regularmente (promedio: 13 veces en 17 semanas). Los niveles de frecuencia cardíaca (HR) y del índice de esfuerzo percibido (RPE) de las etapas demostraron que el protocolo de SRT fue verdaderamente submáximo y no causó una carga de entrenamiento notable, por lo que se trata de un protocolo de entrada en calor adecuado para ejercicios de alta intensidad.

Estimadores del rendimiento de resistencia

Se observaron correlaciones muy grandes entre las variables de SRT, sobre todo RS2 y RS3, y RSmax (Tabla 2). Este hallazgo sugiere que la intensidad de la carrera debe alcanzar un nivel de 80-90 % de HRmax para predecir las variables de rendimiento de resistencia máximas (VO2max, RSmax), algo que corrobora los resultados de Lamberts et al (7) y de Otter et al. (14). Previamente se observaron correlaciones ligeramente más altas entre la potencia de ciclismo que corresponde la intensidad de 80 % ($r=0,88$) y 90% ($r=0,94$) de HRmax y el rendimiento máximo de ciclismo (7), y la potencia de remo a 90 % de HRmax y el tiempo de remo máximo de 2000 m ($r=-0,93$) (14), lo que puede ser explicado por condiciones de evaluación más estandarizadas (laboratorio) que las condiciones del estudio presente (al aire libre). Además, nosotros observamos que el mejor estimador de RS en LT2 en el test de carrera submáximo fue RS en 80 % de HRmax, y RS a 70 % de HRmax fue el mejor estimador para RS en LT1. Esto es razonable porque la velocidad de carrera (RS) de esas etapas está cerca de la velocidad de carrera de los umbrales del lactato. Se ha demostrado que la recuperación de la frecuencia cardíaca (HRR) post ejercicio refleja la actividad autonómica cardíaca y la adaptación al entrenamiento (4, 8, 13). En el estudio presente, la HRR después del SRT se correlacionó moderadamente con VO2max, pero no se correlacionó con el rendimiento de resistencia. El hallazgo presente apoya la noción que la recuperación cardiorrespiratoria más rápida después del ejercicio está relacionada con una mayor capacidad aeróbica tal como había sido informado en el trabajo de Daanen et al. (22).

Supervisión de la adaptación al entrenamiento

El principal hallazgo de este estudio es que los cambios de RS2 y RS3 en SRT podían reflejar los cambios en las variables de rendimiento de resistencia (VO2max, RSmax, RS en LT2, RS en LT1). Además, el análisis de agrupamiento reveló que es posible identificar quienes tienen la mejor y la peor respuesta durante el entrenamiento en base a los cambios en la velocidad de carrera (RS) a 80% y 90 % de HRmax. Además, las tendencias de los cambios en RS a 90 % de HRmax permiten una identificación más exacta de la cantidad de mejora en el rendimiento de resistencia máxima en los cuatro agrupamientos. Previamente Buchheit et al (4) observaron que el cambio en la HR del ejercicio durante un test de carrera submáximo a una intensidad de 60 % de la velocidad aeróbica máxima, no era diferente entre respondedores y no respondedores durante un entrenamiento de 8 semanas. Según los resultados presentes, se necesita una intensidad de 80-90 de HRmax para supervisar los cambios en las variables de rendimiento de resistencia durante el entrenamiento. Previamente, nosotros observamos que el cambio del índice HR-RS medido a partir de cada ejercicio de carrera continua se correlacionó moderadamente ($r=0,43-0,61$) con el cambio de velocidad de carrera máxima durante el entrenamiento de resistencia de 28 semanas (10). Sin embargo muchos factores externos (como la duración e intensidad del ejercicio) e internos (por ejemplo el nivel de hidratación, la temperatura corporal y la deriva cardíaca) pueden alterar el uso de la relación entre RS y HR (11, 12, 23) como herramienta para supervisar la adaptación al entrenamiento. La duración e intensidad del protocolo estandarizadas en el estudio presente disminuyeron los posibles factores de alteración, por lo tanto esto podría explicar las mayores correlaciones observadas entre los cambios en RS de SRT y el cambio en las variables de rendimiento de resistencia en el estudio presente en comparación con nuestros resultados previos (10).

El nuevo hallazgo que la velocidad de carrera (RS) en el test de carrera submáximo puede ser utilizada para supervisar la adaptación al entrenamiento, se basa en las observaciones sobre la relación entre la disminución en la HR del ejercicio y las mejoras positivas en el rendimiento de resistencia (4-6, 10). Sin embargo, hay que tener presente que también la adaptación negativa al entrenamiento, como en el caso del sobreentrenamiento a corto plazo o del sobreentrenamiento, puede estar relacionada con una menor HR y HRmax durante el ejercicio (24, 25). Por otra parte el índice de esfuerzo percibido (RPE) puede aumentar a niveles submáximos en los estados de sobreentrenamiento a corto plazo o sobreentrenamiento porque uno debe trabajar más duro para lograr el mismo nivel de HR debido a una intensidad relativamente mayor si la HRmax disminuye (24). Por lo tanto, el índice de esfuerzo percibido (RPE) junto con los datos de velocidad de carrera nos proporcionan información razonable sobre la adaptación al entrenamiento. En el estudio presente, el RPE se mantuvo estable en los agrupamientos, lo que no presenta ninguna señal de sobreentrenamiento a corto plazo.

Previamente, Lamberts et al. (13) observaron que existía una relación entre un cambio de la recuperación de la frecuencia cardíaca (HRR) después de una prueba contrarreloj de ciclismo de 40 km y los cambios en el rendimiento de ciclismo máximo ($r=0,73 - 0,95$) después de 4 semanas de entrenamiento de alta intensidad. Además, la HRR ha sido asociada con

el cambio en la carga de entrenamiento y el rendimiento de resistencia (8, 26). En contraste con lo observado en estudios anteriores, nosotros no observamos ninguna relación entre el cambio de HRR y los cambios en las variables de resistencia. En cambio, nuestro hallazgo coincide con lo observado en los estudios de Buchheit et al. (27, 28) y Otter et al. (14). La ausencia de relación puede ser explicada por la relativa homogeneidad del grupo de sujetos del estudio presente. Parecería que la relación es más débil en los grupos homogéneos (14). Los resultados contradictorios entre los estudios también pueden ser explicados por diferencias en los protocolos de medición, tales como la duración e intensidad de los ejercicios, así como también por los horarios en que se determinó la HRR. Por otra parte, la intensidad durante la tercera etapa fue exactamente la misma (87-92 % de HRmax) en comparación con lo recomendado por Lamberts et al. (29) donde la intensidad del ejercicio debía estar entre 86-93% de HRmax para alcanzar el nivel más alto de sensibilidad para detectar los cambios significativos en HRR. Los estudios futuros deberían centrarse en los efectos de los problemas metodológicos para determinar la HRR post ejercicio.

Una limitación del estudio presente fue el número relativamente pequeño de sujetos. Esto no permitió que pudiéramos realizar una comparación sistemática entre los sexos. Además, los valores faltantes debidos a enfermedad, lesiones, valores incorrectos de HR o del GPS durante el test de carrera submáximo semanal pudieron provocar alguna fluctuación en las tendencias debido a la gran variación entre los individuos. Por lo tanto, no se pudo aplicar el ANOVA de mediciones repetidas como método estadístico.

En cambio, debido a la presencia de datos faltantes pudimos aplicar análisis de agrupamiento.

Aplicaciones prácticas

Las velocidades de carrera de 80 y 90% de HRmax, que en trabajos previos se había observado que predecían el rendimiento de resistencia en ciclismo (13) y remo (14), fueron las variables más competentes para reflejar los cambios en el rendimiento máximo de carrera durante el entrenamiento. Además, la supervisión del cambio en RS a 90 % de HRmax permite identificar a aquellos individuos que no logran adaptaciones positivas durante el entrenamiento. Ésta es información esencial para entrenadores y atletas y les permite ajustar el programa de entrenamiento para alcanzar mejores resultados. Independientemente de la ausencia de relación entre el cambio en la HRR y la adaptación al entrenamiento en el estudio presente, otros estudios propusieron que la HRR refleja el cambio en la carga de entrenamiento (13) y describe la aptitud aeróbica (22), tal como se observó en el estudio presente. Por consiguiente, se recomienda que el test de carrera submáximo incluya las mediciones de la velocidad de carrera (RS) (en intensidades de 80-90 % de HRmax), la recuperación de la frecuencia cardíaca (HRR) post ejercicio y el índice de esfuerzo percibido (RPE) para supervisar el estado cardiorrespiratorio y la regulación autonómica cardíaca. Los tests submaximos presentan un gran potencial como herramienta práctica para el monitoreo regular de la adaptación individual al entrenamiento de resistencia en condiciones de campo.

CONCLUSIONES

La velocidad de carrera durante un SRT pudo predecir el rendimiento de resistencia máximo. Este estudio también demostró que la velocidad de carrera a 80-90 % HRmax durante el SRT pudo monitorear la adaptación al entrenamiento de resistencia de corredores de resistencia recreacionales. Los estudios futuros deben evaluar si individualizar el programa de entrenamiento en base a SRT sería más productivo que un programa de entrenamiento tradicional, predeterminado.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados del estudio actual no constituyen una adhesión al producto por parte de los autores o de la revista. El financiamiento para realizar este estudio fue proporcionado por el Ministerio de Educación y Cultura Finlandés. El estudio se realizó en KIHU (Instituto de investigación para los deportes olímpicos) junto con el Departamento de Biología de Actividad Física de la Universidad de Jyväskylä. Los autores desean agradecer a Sirpa Vänttinen por su gran ayuda durante este estudio, y a los sujetos por haber participado en el estudio.

REFERENCIAS

1. Bouchard, C., Rankinen T. (2001). Individual differences in response to regular physical activity. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33(6 Suppl):S446-51; discussion S452-3.
2. Vollaard, N., B., Constantin-Teodosiu, D., Fredriksson K., et al. (2009). Systematic analysis of adaptations in aerobic capacity and submaximal energy metabolism provides a unique insight into determinants of human aerobic performance. *J. Appl. Physiol.* 106(5):1479-1486.
3. Vesterinen, V., Hakkinen, K., Hynynen, E., Mikkola, J., Hokka, L., Nummela, A. (2013). Heart rate variability in prediction of individual adaptation to endurance training in recreational endurance runners. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*23(2):171-180.
4. Buchheit, M., Chivot, A., Parouty, J., et al. (2010). Monitoring endurance running performance using cardiac parasympathetic function. *Eur. J. Appl. Physiol.* 108(6):1153-1167.
5. Scharhag-Rosenberger F., Meyer, T., Walitzek, S., Kindermann W. (2009). Time course of changes in endurance capacity: A 1-yr training study. *Med. Sci. Sports Exerc.* 41(5):1130-1137.
6. Borresen J., Lambert, M., I. (2008). Autonomic control of heart rate during and after exercise :Measurements and implications for monitoring training status. *Sports Med.* 38(8):633-420
7. Lamberts R., P., Swart, J., Noakes, T., D., Lambert, M., I. (2011). A novel submaximal cycle test to monitor fatigue and predict cycling performance. *Br. J. Sports Med.*45:797-804.
8. Lamberts, R., P., Swart, J., Capostagno, B., Noakes, T., D., Lambert, M., I. (2010). Heart rate recovery as a guide to monitor fatigue and predict changes in performance parameters. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 20(3):449-457.
9. Lamberts, R., P. (2014). Predicting cycling performance in trained to elite male and female cyclists. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*9(4):610-614.
10. Vesterinen, V., Hokka, L., Hynynen, E., Mikkola, J., Hakkinen, K., Nummela, A. (2014). Heart rate-running speed index may be an efficient method of monitoring endurance training adaptation. *J Strength Cond Res.*28(4):902-908.
11. Lambert, M., I., Mbambo, Z., H., St Clair Gibson A. (1998). Heart rate during training and competition for long-distance running. *J. Sports Sci.*16 Suppl:S85-90.
12. Achten J., Jeukendrup, A., E. (2003). Heart rate monitoring: Applications and limitations. *Sports Med.*33(7):517-538.
13. Lamberts, R., P., Swart, J., Noakes, T., D., Lambert, M.,I. (2009). Changes in heart rate recovery after high-intensity training in well-trained cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol.*105(5):705-713.
14. Otter, R., T., Brink, M., S., Lamberts, R., P., Lemmink, K., A. (2015). A new submaximal rowing test to predict 2000 meter rowing ergometer performance. *J. Strength Cond. Res.*
15. Borg, G., A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Med. Sci. Sports Exerc.*14(5):377-440
16. MacQueen, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Le Cam LM, Neyman J, eds. (1967). Proceedings of the fifth berkeley symposium on mathematical statistics and probability. 1st ed. University of California Press: Berkeley, CA; 281-297.
17. Little, R., J., Rubin, D., B. (1987). Statistical analysis with missing data. New York: John Wiley & Sons, Inc;
18. Äyrämö, S. (2006). Knowledge mining using robust clustering. *Ph.D Thesis. Department of Mathematical Information Technology, University of Jyväskylä, Finland, Jyväskylä Studies in Computing* 63.
19. Hopkins, W., G., Marshall, S., W., Batterham, A., M., Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med. Sci. Sports Exerc.* 41(1):3-13.
20. Lamberts, R., P., Lambert, M., I. (2009). Day-to-day variation in heart rate at different levels of submaximal exertion: Implications for monitoring training. *J. Strength Cond. Res.* 23(3):1005-1010.
21. Lamberts, R., P., Lemmink, K., A., Durandt, J., J., Lambert, M., I. (2004). Variation in heart rate during submaximal exercise: Implications for monitoring training. *J. Strength Cond. Res.* 18(3):641-645.
22. Daanen, H., A., Lamberts, R., P., Kallen, V., L., Jin, A., Van Meeteren, N., L. (2012). A systematic review on heart-rate recovery to monitor changes in training status in athletes. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*7(3):251-260.
23. Boudet, G., Albuissou, E., Bedu, M., Chamoux, A. (2004). Heart rate running speed relationships-during exhaustive bouts in the laboratory. *Can. J. Appl. Physiol.*29(6):731-742.
24. Le Meur, Y., Hausswirth, C., Natta, F., Couturier, A., Bignet, F., Vidal, P., P. (1985). A multidisciplinary approach to overreaching detection in endurance trained athletes. *J. Appl. Physiol.* 2013;114(3):411-420.
25. Uusitalo, A., L., Uusitalo, A., J., Rusko, H., K. (1998). Endurance training, overtraining and baroreflex sensitivity in female athletes. *Clin. Physiol.* 18(6):510-520.
26. Borresen, J., Lambert, M., I. (2007). Changes in heart rate recovery in response to acute changes in training load. *Eur. J. Appl. Physiol.* 101(4):503-511.
27. Buchheit, M., Simpson, M., B., Al Haddad, H., Bourdon, P., C., Mendez-Villanueva A. (2012). Monitoring changes in physical performance with heart rate measures in young soccer players. *Eur. J. Appl. Physiol.*112(2):711-723.
28. Buchheit, M., Racinais, S., Bilsborough, J.,C., et al. (2013). Monitoring fitness, fatigue and running performance during a pre-season training camp in elite football players. *J. Sci. Med. Sport.* 16(6):550-555.
29. Lamberts, R., P., Maskell, S., Borresen, J., Lambert, M., I. (2011). Adapting workload improves the measurement of heart rate recovery. *Int. J. Sports Med.*32(9):698-702.

Cita Original

Ville Vesterinen, Ari Nummela, Sami Äyrämö, Tanja Laine, Esa Hynynen, Jussi Mikkola and Keijo Häkkinen. Monitoring training adaptation with a submaximal running test in field conditions