PubliCE, (PubliCE) 2008

Monograph

Cómo Respiran los Atletas de Resistencia durante el Ejercicio Progresivo hasta el Agotamiento: Interacción entre el Volumen Corriente y la Frecuencia Respiratoria

Daniel G Carey[1], German J Pliego[2] y Robert L Raymond[2]

[1]*Health and Human Performance, University of St.Thomas, St. Paul, Minnesota, Estados Unidos.*
[2]*Quantitative Methods and Computer Science, University of St Thomas, St. Paul, Minnesota, Estados Unidos.*

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue evaluar las respuestas agudas del volumen corriente (TV), ritmo respiratorio (RR) y ventilación (V_E) al ejercicio incremental en cicloergómetro (CE) y cinta rodante (TM) en atletas entrenados. Los triatletas (n=16, 10 varones, 6 mujeres) realizaron una evaluación de VO_2 máx. en CE y TM. Los puntos de quiebre fueron analizados en un diseño macro para seleccionar puntos de quiebre con el método de error de cuadrados mínimos, y la significancia de la pendiente fue valorada a través de ANOVA de regresión lineal. La V_E máx. fue significativamente mayor en CE (157.5±29.4 vs. 145.7±27.5 l/min, CE vs. TM, respectivamente). La mayor V_E en CE fue el resultado de un mayor RR en CE (51.7±6.7 vs. 48.3±5.7 respiraciones/min CE vs. TM, respectivamente). Tanto para la evaluación en CE como en TM, la V_E y el RR tuvieron una correlación significativa con el VO_2 máx. El TV máx. no estuvo relacionado con el VO_2 máx. en ninguna de las evaluaciones (CE o TM). Los patrones de la respuesta del TV fueron altamente variables, con un 37,5% de los sujetos mostrando una meseta o una desviación descendente en el punto de quiebre, mientras que el 62,5% restante exhibió una desviación lineal o ascendente en el punto de quiebre. El análisis Chi Cuadrado no indicó diferencias en los patrones de respuesta entre CE y TM, y la respuesta del TV no estuvo relacionada con el VO_2 máx. En los sujetos que mostraron un punto de quiebre o una desviación descendente en el TV, el RR se incrementó exponencialmente para facilitar un incremento en la V_E. La capacidad para ventilar grandes volúmenes de aire durante un ejercicio máximo es importante para alcanzar altos valores de VO_2 máx. Sin embargo, ni los patrones de TV máx. ni los de TV, parecen importantes en el intento de alcanzar altos valores de VO_2 máx.

Palabras Clave: ventilación, VO₂ máx, ritmo respiratorio

INTRODUCCION

A medida que los requerimientos metabólicos del ejercicio aumentan, los pulmones deben proveer tanto a los músculos que trabajan como a los músculos respiratorios, de la cantidad adecuada de oxígeno para satisfacer la demanda. En los comienzos de un ejercicio incremental, la ventilación es estimulada principalmente por los mecanoceptores (propioceptores y husos musculares) situados en los músculos que se ejercitan, que envían señales a los centros respiratorios del cerebro para incrementar sobre todo el volumen (volumen corriente; TV), pero también la frecuencia (ritmo respiratorio; RR) de la respiración (1). Esto ocurre antes de la producción de desechos metabólicos (disminución del pH, aumento de CO_2, iones H^+). Como la intensidad del ejercicio aumenta, el CO_2 no-metabólico, producido cuando el cociente de intercambio respiratorio (RER) excede a 1,0, conduce a un incremento en la producción del ion H^+, lo cual se aprecia en la siguiente fórmula:

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$

Los iones de H^+ contribuyen a la disminución del pH e interfieren con la fuerza de la contracción del músculo. Los cuerpos carotídeos localizados en la bifurcación de las arterias carótidas comunes, sirven para "analizar la sangre", reconociendo sustancias que alteran el equilibrio ácido-base (CO_2, iones H^+, etc.) y aumentar por consiguiente la ventilación (amortiguación respiratoria de la acidosis metabólica). Aquellos individuos que han tenido los cuerpos carotídeos resecados han demostrado una respuesta ventilatoria atenuada a la acumulación de CO_2 (2).

A medida que la intensidad aumenta, la demanda metabólica de oxígeno se incrementa en forma lineal.

Sin embargo, antes de la fatiga, la ventilación se incrementa exponencialmente para mantener el oxígeno alveolar (PAO_2) y, por consiguiente, la presión arterial de oxígeno (PaO_2). Puesto que la ventilación es el producto entre el volumen corriente (TV) y el ritmo respiratorio (RR), el atleta puede elegir cualquier combinación de estas 2 variables para aumentar la ventilación. La recomendación general ha sido elegir la combinación de TV y RR que sea natural a cada atleta. Sin embargo, hay algunas evidencias que indican que mantener un TV más alto y un RR más bajo podría resultar en bajas demandas de oxígeno, tanto metabólicas como respiratorias (3), incrementando así la eficiencia y mejorando el rendimiento. Así como la V_E se incrementa exponencialmente durante el ejercicio incremental hasta el agotamiento, el trabajo de la respiración se incrementa exponencialmente, de manera que los músculos respiratorios requieren del 10-18% (4, 5, 6) del total del consumo de oxígeno corporal cuando se alcanza el VO_2 máx. Además de los requerimientos de O_2 de los músculos ventilatorios, 14-16% del gasto cardíaco es desviado desde los músculos que se ejercitan hacia los músculos respiratorios (7). En atletas altamente entrenados, la hipoxemia arterial ocurre posiblemente (8) debido al alto gasto cardíaco y al tiempo de tránsito disminuido de los glóbulos rojos a través de los vasos pulmonares. Además de la gran demanda metabólica de los pulmones, existe también evidencia de que la capacidad mecánica de los músculos respiratorios para contraerse es alcanzada (5) o excedida (9). Sin embargo esto ha sido rechazado (4, 10). Se afirma que, como los requisitos metabólicos, las limitaciones mecánicas de músculos ventilatorios se alcanzadan solamente en atletas altamente entrenados (11).

Mientras la intensidad del ejercicio aumenta, el atleta elige alguna combinación de TV y RR que supuestamente maximiza la eficiencia respiratoria y minimiza la demanda de los músculos respiratorios. Dempsey (11) proporcionó una revisión excelente a cerca de la mecánica y la fisiología del sistema respiratorio durante el ejercicio. Este autor establece que "debe alcanzarse una combinación cuidadosamente seleccionada de frecuencia y de volumen corriente crecientes, considerando la necesidad de reducir al mínimo el espacio muerto ventilatorio (es decir, el aumento en la frecuencia de la respiración no debe ser excesivo). Al mismo tiempo, esta combinación protege contra un aumento excesivo en el TV, que requeriría la generación excesiva de presiones intratorácicas subatmosféricas y por lo tanto una gran cantidad de trabajo por parte los músculos inspiratorios…el resultado es, con pocas excepciones, una respuesta ventilatoria casi perfecta y muy eficiente al ejercicio" (p. 255).

La mayoría de los estudios han divulgado el aplanamiento del TV antes del agotamiento (5, 12-13). La meseta en el TV ocurre porque el trabajo de la respiración ante volúmenes inspiratorios finales altos y bajos, necesarios para aumentar el TV, es excesivo e ineficaz. Sin importar la dinámica del TV, el RR en un cierto punto del ejercicio incremental, aumenta exponencialmente, en muchos estudios ha sido divulgado que este aumento exponencial ocurre en el umbral anaeeróbico y puede servir como un marcador del mismo (14-16). Mientras que parece ser importante poder intercambiar altos volúmenes del aire (V_E) para mantener la PaO_2 y la saturación de la hemoglobina, se ha divulgado que los atletas de resistencia pueden tener un equivalente ventilatorio para el CO_2 (V_E/VCO_2) más bajo que los no atletas (17). Se presume que esta desensibilización al CO_2 y su capacidad de aumentar a la V_E en los atletas pueden ser una adaptación al entrenamiento y confiere una ventaja para el rendimiento del atleta (17).

De los resultados de las investigaciones anteriores, parecería que, cuando el volumen corriente alcanza un nivel crítico, donde aumentos posteriores darían lugar a un patrón de respiración de ineficiencia de O_2, los aumentos en la V_E serían logrados solamente por el incremento del RR. Se presume que el TV hace una meseta en este nivel crítico y que los aumentos exponenciales en la V_E son debido a los aumentos en el RR. El objetivo principal de este trabajo es estudiar la interacción del TV y del RR durante el ejercicio incremental hasta el agotamiento en triatletas competitivos. Será comparado el patrón de la respuesta al ejercicio incremental en cicloergómetro y cinta rodante.

METODOS

Sujetos

Los sujetos(n=16, 10 varones, 6 mujeres) fueron reclutados a través de un anuncio colocado en un sitio web local popular visitado por los triatletas. El criterio de inclusión fue la participación como mínimo en 2 triatlones durante el último año. Los sujetos recopilaron información del entrenamiento y el historial de carreras realizadas en los últimos 2 años.

Los sujetos habían competido en 10,3±6,2 triatlones que consistieron en: sprint, 4,0±1,7; olímpico, 1,9±1,1; media distancia de Ironman®, 1,4±0,3, y distancia Ironman®, 3,0±2,7 durante el período de dos años.Las horas de entrenamiento semanales (13,2±6,1) fueron divididas en pedestrismo (4,0±1,4), ciclismo (5,1±2,2), natación (3,0±2,1) y "otros" (1,1±0,6). Tanto los datos descriptivos como los resultados de la prueba de VO_2 máx. indicaron que los sujetos tenían 33.9±6.4 años de edad, pesaban 76,3±12,3 kg, tenían un 14,1±5,4% de grasa corporal, y presentaban valores de VO_2 máx. de 68,4±11,1 $mL.kg^{-1}.min^{-1}$. La aprobación de este estudio fue concedida por el Comité de Revisión Institucional (IRB) de la Universidad de St. Thomas antes de la recolección de datos. Los sujetos leyeron y firmaron formularios de consentimiento antes de la prueba inicial.

Procedimientos

Los sujetos se presentaron en el laboratorio en 3 ocasiones separadas en estado post-absortivo sin haber entrenado durante las 24 horas previas. Aunque en las 3 ocasiones se realizaron evaluaciones de máximo consumo de oxígeno (VO_2 máx.) en cicloergómetro, test de VO_2 máx. en cinta rodante y una prueba de 30 minutos, solamente los resultados del VO_2 máx. obtenido en cicloergómetro y cinta rodante serán discutidos aquí. La altura (cm) y el peso (kg) fueron medidos usando una balanza Seca 220 (*Seca Corporation*, Hamburgo, Alemania). La altura y el peso fueron medidos mientras los sujetos llevaban pantalones cortos y calcetines inmediatamente antes de la prueba de VO_2 máx. El porcentaje de grasa fue determinado a través de pesaje hidrostático usando una célula de carga y un indicador digital (*Ohaus Corporation*, Florham Park, NJ) inmediatamente después de la prueba inicial de VO_2 máx. Se dieron instrucciones a los sujetos de no injerir alimentos 3 horas antes de la prueba y de evitar ejercicio intenso 24 horas antes.

El test en cicloergómetro (CE) fue realizado en un dispositivo Lode Excalibur Sport (Electramed Corporation, Holanda). Los sujetos hicieron los ajustes pertinentes de altura del asiento y distancia de manubrio antes de la prueba. La prueba de VO_2 máx. comenzó en 25 vatios y aumentó 25 vatios por minuto. En un esfuerzo por estandarizar el test, los participantes recibieron instrucciones de mantener una cadencia de 90-100 rpm mientras les fuera posible. La prueba fue terminada cuando la cadencia cayó debajo de 50 rpm. Los sujetos alcanzaron una carga máxima media de 367,2±59.8 vatios, resultantes de una duración media de 14,7±2,4 minutos. La prueba de VO_2 máx. en cinta rodante (TM) fue realizada en una cinta Quinton Q55xt siguiendo el protocolo de Bruce modificado. El protocolo de Bruce fue modificado para dar lugar a aumentos más pequeños de la velocidad y la pendiente cada minuto, en comparación con el protocolo estándar de Bruce con aumentos más grandes de la carga cada 3 minutos. La frecuencia cardiaca fue registrada durante cada minuto de la prueba y en el agotamiento usando un monitor de la frecuencia cardiaca Polar Vantage XL (*Polar Electro*, Woodbury, New York). El análisis de gases (VE, TV, RR) fue realizado mediante un sistema de medición metabólica Medical Graphics VO2000, usando el promedio de 30 segundos. Un neumotacómetro de presión diferencial direccional determinó medidas del volumen, mientras que una celda de carga galvánica y el analizador infrarrojo determinaron el O_2 y el CO_2, respectivamente. Este sistema ha sido previamente validado (18). El VO_2 máx. fue tomado como el VO_2 más alto alcanzado en cada incremento de 30 s. Todos los sujetos alcanzaron por lo menos 2 de los 3 criterios siguientes para el logro de VO_2 máx.: 1) un aumento de menos de 200 ml de O_2/min en las 2 etapas finales de la prueba, 2) el 95% o más de la frecuencia cardiaca máxima predicha, 3) un cociente de intercambio respiratorio máximo (RER) de 1,1 o mayor.

Análisis Estadísticos

El análisis de varianza de regresión lineal fue utilizado para determinar el nivel de significancia de las pendientes. Los puntos de quiebre en variables continuas se determinaron a través de un macro usando el método del error cuadrado

mínimo. Para determinar las diferencias entre los grupos se utilizaron los tests t de Student para datos de a pares e independientes. El análisis Chi cuadrado determinó las diferencias en los patrones de respuesta ventilatoria. La correlación de Pearson determinó la relación entre variables. Para todo el análisis el valor alfa se estableció en $p<0.05$.

Con el tamaño de muestra de 16, usando una diferencia significativa en los valores medios de 4 $mL.kg^{-1}.min^{-1}$, y desviación estándar estimativa de 4 $mL.kg^{-1}.min^{-1}$ para una muestra homogénea, se determinó una potencia de 78,1. El análisis de la potencia fue realizado usando el programa Minitab.

RESULTADOS

Comparación entre CE y TM

La Tabla 1 muestra los valores máximos para el TV, RR, y VE, tanto para los datos recolectados en cicloergómetro (CE) como en cinta rodante (TM). No se observaron diferencias significativas en el TV máx. ($t=0,33$, $p=0,749$). Sin embargo, la V_E máx. fue significativamente mayor en CE que en TM ($t=2,73$, $p=0,016$). Mientras que el RR máximo no fue significativamente mayor en CE en comparación con TM, la más alta V_E máx. en CE puede ser explicada por un mayor RR máx. a favor del CE (51,7±6,7 respiraciones/minuto) en comparación con TM (48,3±5,7 respiraciones/minuto, $t=2.06$, $p=0,057$).

Los altos valores de V_E máx. estuvieron significativamente correlacionados tanto con el TV máx. ($r=0,795$, $p=0,000$) como con el RR máx. ($r=0.672$, $p=0,004$) en CE. Para TM, los altos valores de V_E máx. también estuvieron significativamente correlacionados con los altos TV máx. ($r=0,747$, $p=0,001$), pero no a altos RR máx. ($r=0,423$, $p=0,103$).

Variable	CE	MT
TV máx. (mL)	3196±468	3179±505
RR máx.	51.7±6.7	48.3±5.7
VE máx.	157.5±29.4	145.0±27.5

Tabla 1. *Valores máximos respiratorios.*

Patrones de Respuesta del TV

La Tabla 2 muestra porcentajes de distintos patrones de respuesta del TV en los tests desde el principio del ejercicio hasta la fatiga. Una “meseta” implica que la pendiente de los puntos de los datos después del punto de quiebre de la linealidad no era significativamente diferente ($p>0,05$) de una pendiente igual a cero. La “linealidad” implica que todos los datos están mejor representados por una sola línea recta. La “desviación ascendente” indica una pendiente significativamente positiva ($p>0.05$) de los datos después del punto de quiebre, mientras que la “desviación descendente” implica una pendiente significativamente negativa ($p<0,05$) después del punto de quiebre. El análisis Chi cuadrado no muestra diferencias en los resultados esperados y observados por célula ($X2=4,267$, $p=0,234$), indicando una ausencia de relación entre el patrón de respuesta del TV y el modo valoración del VO_2 máx. (CE vs. TM).

Patrón de respuesta	CE	TM
Meseta	37,5% (n=6)	25,0% (n=4)
Lineal	31,3% (n=5)	62,5% (n=10)
Desviación ascendente	18,8% (n=3)	12,5% (n=2)
Desviación descendente	12,5 (n=2)	0,0% (n=0)

Tabla 2. *Patrones de respuesta del TV durante el ejercicio incremental.*

En un esfuerzo por determinar si el patrón de respuesta afectaba al VO_2 máx., aquellos sujetos que mostraron un patrón en el cual el TV se incrementó continuamente durante el test (lineal y desviación ascendente) fueron comparados con los sujetos que no mostraron incrementos y con los que tuvieron una disminución del TV después del punto de quiebre (meseta y desviación descendente). Se puede plantear la hipótesis que sostiene que los patrones anteriores podrían presentar una ventaja para alcanzar mayores valores de VO_2 máx. Del total de 32 evaluaciones de VO_2 máx., 12 (37,5%) exhibieron una meseta o una desviación descendente, mientras que 20 (62,5%) exhibieron un patrón lineal o ascendente. El VO_2 máx. medio (69,0±11,2 $mL.kg^{-1}.min^{-1}$) del grupo "meseta/desviación descendente" no mostró diferencias significativas con los valores del VO_2 máx.
(68,4±12,8 $mL.kg^{-1}.min^{-1}$) del grupo "lineal/desviación ascendente" (t=0,14, p=0,890).

Punto de Quiebre para el TV comparado con el de la V_E y el RR

Para las pruebas en las cuales se manifestó una meseta o una desviación descendente en el TV, este punto de quiebre del TV fue comparado con los puntos de quiebre de la V_E y del RR. Este análisis determina si el aumento exponencial en la V_E comienza exactamente cuando el TV ha alcanzado un valor máximo y el RR se incrementa exponencialmente. La Tabla 3 muestra puntos de quiebre para el TV, V_E y RR como porcentajes del VO_2 máx. No se encontró diferencia significativa en ninguna comparación de a pares (TV vs. RR: t=0,11, p=0,917) (TV vs. V_E: t=0,37, p=0,722) (RR vs. V_E: t=0,84, p=0,418) (Tabla 3). La Figura 1 exhibe el aumento simultáneo en VE y RR con la meseta del TV.

Variable	Media±DE
TV	73,9±14,2
RR	73,5±6,8
VE	72,3±8,3

Tabla 3. *Puntos de quiebre en TV, RR y VE como % VO_2 máx. durante el ejercicio incremental.*

Contribución de los Parámetros Ventilatorios al VO_2 máx.

Tratando de determinar si la V_E máx., TV máx., y RR máx. contribuyen para alcanzar una mayor capacidad aeróbica, estas variables fueron correlacionadas con el VO_2 máx. La V_E máx. estuvo significativamente correlacionada con el VO_2 máx. para CE (r=0.515, p=0.041) y TM (r=0.532, p=0.034). El RR máx. también presentó una correlación significativa con el VO_2 máx. para CE (r=0.605, p=0.013) y TM (0.611, p=0.012). Sin embargo, el TV máx. no presentó una correlación significativa con el VO_2 máx. para CE (r=0.177, p=0.512) o TM (r=0.115, p=0.672).

DISCUSION

Comparación de los Valores Máximos entre CE y TM

Los valores más elevados de la V_E máx. en CE comparados con los obtenidos en TM observados en el presente trabajo coinciden con otros resultados publicados (19, 20). Sin embargo, otros autores no han encontrado ninguna diferencia en la V_E máx. entre CE y TM (21.22). La discrepancia se puede explicar por el nivel y el tipo de entrenamiento realizados por los sujetos. Nuestros sujetos y los de Schneider (20) y de Dengel (19) fueron triatletas experimentados, mientras que los sujetos en el estudio de Hermansen (21) fueron descritos como "55 sujetos masculinos sanos", que incluyó la gama completa de entrenamiento desde atletas de resistencia de nivel competitivo a "estudiantes desentrenados". Es posible que el dolor y la fatiga muscular local experimentados en CE pueden causar una finalización prematura de ejercicio en los no atletas. Zhou y otros (22) publicaron 13,3 l/min más de V_E para CE que para TM en "triatletas recreacionales" (169,8±10,4 vs. 156,5±6,4), pero esta diferencia no fue significativa (p>0,05).

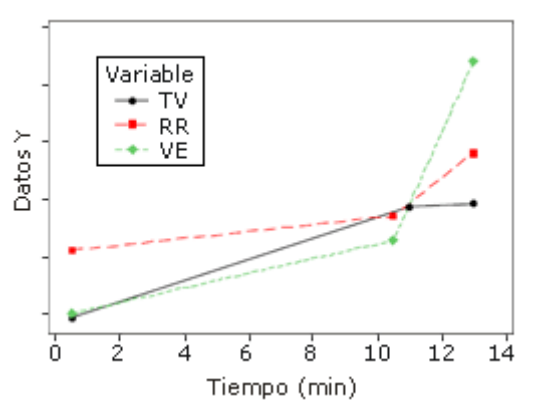

Figura 1. *Relación entre los puntos de quiebre del TV, RR y V_E.*

Una V_E máx. más elevada en CE que en TM puede ser el resultado de una mayor contribución aferente de una masa muscular más pequeña para mantener un nivel dado de consumo de O_2. De hecho, en este estudio el equivalente ventilatorio para el O_2 (V_E/VO_2) en CE fue 30.9±4.2 comparado a 28.4±3.9 (t=1.74, p=0.092) para TM, apoyando el concepto que indica que una masa muscular más pequeña usada en CE en comparación con TM, requiere una V_E más elevada para mantener un consumo de O_2 dado.

Nuestra diferencia no significativa en RR máx. para CE en comparación con TM no coincide con los resultados de otros autores, quienes han encontrado un RR máx. significativamente más alto para CE (20). Si bien no es significativa (p>0.05), la diferencia media de 3.4 respiraciones/minuto (51.7±6.7 vs. 48.3±5.7) probablemente contribuye a una V_E significativamente mayor en CE que en TM.

La diferencia se puede explicar posiblemente por el concepto de arrastre, en el cual el ritmo del ejercicio afecta al patrón de respiración (23). Las rpm relativamente altas (90-100 rpm) para CE alcanzadas en este estudio pudieron haber dado lugar a un mayor RR e hiperventilación. Nuestros hallazgos de diferencia no significativa en el TV máx. son apoyados por los resultados de otros estudios (20).

Patrones de Respuesta para el TV

Nuestros hallazgos de un aumento continuo en el TV desde el inicio del ejercicio hasta la fatiga en 62.5% de nuestras pruebas no coincide con los resultados divulgados en otros estudios, en los cuales se alcanza una meseta en el TV (5, 12). Se ha planteado la teoría que sostiene que el atleta continuará aumentando el TV hasta que se alcance un volumen crítico, sobre el cual el trabajo mecánico de la respiración y el costo de O_2 de la ventilación llegan a ser excesivos e ineficaces. En este punto, los aumentos posteriores en la V_E serían logrados solamente por un aumento en el RR, mientras que el TV alcanza una meseta.

Observamos este patrón en solamente 6 sujetos (37.5%) en CE y en 4 sujetos (el 25%) en TM, llegando a la conclusión de que el patrón de respuesta respiratoria y la interacción del RR y del TV son altamente variables entre los atletas de resistencia.

El hecho de no haber encontrado ninguna relación entre los valores de VO_2 máx. de los sujetos que mostraron una meseta o exhibieron una desviación descendente en el TV (69,6±11,5 $mL.kg^{-1}.min^{-1}$) y el VO_2 máx. de los sujetos que exhibieron una desviación lineal o ascendente en el TV (67,4±10,3 $mL.kg^{-1}.min^{-1}$), indicaría que el patrón del TV no presenta importancia para el logro del VO_2 máx.

Estos resultados están de algún modo en conflicto con “la combinación cuidadosamente seleccionada de frecuencia y de volumen corriente crecientes” que produce “una respuesta ventilatoria al ejercicio casi perfecta y altamente eficiente” descripta por Dempsey (11). Si es ésta efectivamente una descripción exacta de la ventilación durante ejercicio, ¿porqué es tan variable la respuesta del TV entre los sujetos?, ¿porqué no hay ninguna relación entre la respuesta del TV y el VO_2 máx., si un patrón es eficiente y reduce al mínimo el trabajo respiratorio, mientras que los otros no lo son?. Son necesarias investigaciones adicionales para aclarar el papel del TV y el RR en la producción de una respuesta ventilatoria óptima al ejercicio incremental.

Finalmente, en aquellos los sujetos que exhibieron una meseta o una desviación descendente en el TV, este punto de

quiebre ocurrió en el mismo punto que en RR y V_E. Otros estudios (25) también han divulgado la aparición simultánea de la meseta del TV y del umbral anaeróbico. Sin embargo, no estamos proponiendo que este punto de quiebre pueda servir como marcador del umbral anaeróbico, sobre todo porque este patrón de respiración ocurrió en un porcentaje relativamente pequeño de nuestros sujetos (37,5%). Son necesarias investigaciones adicionales para identificar patrones del TV y explicar la variabilidad en estos patrones, aunque parece que esta variabilidad no afecta al VO_2 máx.

Contribución de los Parámetros Ventilatorios al VO_2 máx.

Los hallazgos de una correlación significativa entre el VO_2 máx. y la V_E máx., incluso en este grupo homogéneo de atletas, indicarían que la capacidad de ventilar grandes volúmenes de aire es un requisito previo al logro de altos valores de VO_2 máx. Una V_E elevada se vuelve necesaria debido al aumento de la diferencia alveolar-arterial de oxígeno, creando esto una mayor demanda para que la ventilación alveolar mantenga la presión y la saturación arterial de O_2 (11). De hecho, las demandas del oxígeno del músculo en el ejercicio pueden exceder la capacidad de los pulmones de mantener la presión arterial O_2, dando por resultado la desaturación de la hemoglobina (24). Hemos encontrado que esta elevada V_E se logra solamente por el aumento exponencial en el RR (37,5%) o por la combinación del incremento exponencial del RR y el incremento lineal en el TV (62,5%).

Conclusión

De los resultados de este estudio, se pueden plantear varias conclusiones. Primero, ni el patrón de TV ni el valor máximo del mismo estuvo relacionado con el VO_2 máx., indicando que el patrón de respuesta y el volumen de TV no son relevantes para el logro del VO_2 máx. En segundo lugar, las mesetas del TV durante el ejercicio incremental, parecen coincidir con los puntos de quiebre de la V_E y el RR. Sin embargo, esta meseta fue observada en solamente 6 sujetos (37,5%) en CE y 4 sujetos (25.0%) en TM. Tercero, los valores más elevados de V_E máx. logrados en CE en comparación con TM, se deben sobre todo a un mayor RR máx. Cuarto, una alta correlación entre V_E máx. y RR máx. en comparación con el VO_2 máx., indicaría que estos dos parámetros ventilatorios se relacionan con el VO_2 máx, y pueden ser requisitos previos para alcanzar altos valores de VO_2 máx.

Nuestras hipótesis originales que planteaban que una vez alcanzado un TV crítico, los aumentos posteriores en la V_E son logrados solamente por incrementos en el RR, no son apoyadas por estos resultados. Durante el ejercicio incremental hasta la fatiga, los individuos adoptarían un patrón de respiración natural. Sin embargo, esto puede o no aplicarse al ejercicio submáximo prolongado realizado por atletas de resistencia.

Dirección para Envío de Correspondencia

Carey, DG, PhD. Health and Human Performance, University of St. Thomas, St. Paul, Minnesota, USA, 55105, teléfono: 651-962-5972, Fax: 651-962-5910, correo electrónico: dgcarey@stthomas.edu.

REFERENCIAS

1. Wasserman K (1978). Breathing during exercise. *New Eng J Med 298(14), 780-785*
2. Whipp B. J (1994). Carotid bodies and breathing in humans. *Thorax 49, 1081-1084*
3. Dicker S. G (1980). Respiratory and heart rate responses to tethered controlled frequency breathing in swimming. *Med Sci Sports Exerc 12, 20- 23*
4. Aaron E. A., Seow K. C., Johnson B. D. and Dempsey J. A (1992). Oxygen cost of exercise hyperpnea: implications for performance. *J Appl Physiol 72 (5), 1818-1825*
5. Johnson B. D., Saupe K. W. and Dempsey J. A (1992). Mechanical constraints on exercise hyperpnea. *J Appl Physiol 73 (3), 874-886*
6. Marks D. E., Robergs R. A., Nelson J., Vella C., Bell-Wilson J. and Apkarian M (2005). Oxygen cost of ventilation and its effect on the VO2 plateau. *JEP 8(5), 1-13. Athletes and Ventilatory Function. 51.*
7. Harms C. A., Wetter T. J., McLaren S. R., Pegelow D. F., Nickele G. A., Nelson W. B., Hanson P. and Dempsey J. A (1998). Effects of respiratory muscle work on cardiac output and its distribution during maximal exercise. *J Appl Physiol 85(2), 609-618*
8. Dempsey J. A., Vidruk E. H. and Mitchell G. S (1985). Pulmonary control systems in exercise: update. *Federation Proc 44, 2260-2270*
9. Agostoni E. and Fenn W. O (1960). Velocity of muscle shortening as a limiting factor in respiratory air flow. *J Appl Physiol 15 (3), 349- 353*
10. Younes M. and Kivinen G (1984). Respiratory mechanics and breathing pattern during and following maximal exercise. *J Appl Physiol Respirat Environ Exercise Physiol 57(6), 1773-1782*
11. Dempsey J. A (2006). ACSM□s Advanced Exercise Physiology. 1st edition. *Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, p.255*

12. Clark J. M., Hagerman F. C. and Gelfand R (1983). Breathing patterns during submaximal and maximal exercise in elite oarsmen. *J Appl Physiol Respirat Environ Exercise Physiol 55 (2), 440- 446*
13. Spiro S. C., Juniper E., Bowman P. and Edwards R. T (1974). An increasing work rate test for assessing the physiological strain of submaximal exercise. *Cli Sci Molec Med 46, 191- 206*
14. Carey D. G., Schwarz L. A., Pliego G. J. and Raymond R. L (2005). Respiratory rate is a valid and reliable marker for the anaerobic threshold: implications for measuring change in fitness. *J Sports Sci Med 4, 482-488*
15. James N. W., Adams G. M. and Wilson A. F (1989). Determination of anaerobic threshold by ventilatory frequency. *Int J Sports Med 10 (3), 192- 196*
16. Neary J. P., Bhambhan Y. N. and Quinney H. A (1985). Validity of breathing frequency to monitor exercise intensity in trained cyclists. *Int J Sports Med 16 (4), 255- 259*
17. Martin B. J., Sparks K. E., Zwillich C. W. and Weil J. V (1979). Low exercise ventilation in endurance athletes. *Med Sci Sports Exerc 11 (2), 181- 185*
18. Bayard A. and Dengel D (1998). Determining the precision of the Medgraphics VO2000 when measuring VO2, VCO2 and VE. *Med Sci Sports Exerc 30, 122- 124*
19. Dengel D. R., Flynn M. G., Costill D. L. and Kirwan J. P (1989). Determinants of success during triathlon competition. *Res Q Exerc Sport 60 (3): 234- 238*
20. Schneider D. A., LaCroix K. A., Atkinson G. R., Troped P. J. and Pollack J (1990). Ventilatory threshold and maximal oxygen uptake during cycling and running in triathletes. *Med Sci Sports Exerc 22 (2), 257- 264*
21. Hermansen L. and Saltin B (1969). Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise. *J Appl Physiol 26 (1), 31- 37*
22. Zhou S., Robson S. J., King M. J. and Davie A. J (1997). Correlations between short-course triathlon performance and physiological variables determined in laboratory cycle and treadmill tests. *J Sports Med Phys Fitness 37, 122- 130*
23. Jasinskas C. L., Wilson B. A. and Hoare J (1980). Entrainment of breathing rate to movement frequency during work at two intensities. *Resp Physiol 42, 199- 209*
24. Dempse J. A. and Wagner P. D (1999). Exercise-induced arterial hypoxemia. *J Appl Physiol 87, 1997- 2006*
25. Martin B. J. and Weil J. V (1979). CO2 and exercise tidal volume. *J Appl Physiol 46, 322-325*

Cita Original

Carey, D.G., Pliego G.J., Raymond R.L. How Endurance Athletes Breathe During Incremental Exercise to Fatigue: Interaction of Tidal Volume and Frequency. JEPonline; 11 (4): 44-51, 2008.