

Monograph

Aptitud Física, Tamaño Corporal, Ventilación y Costo de Oxígeno de la Respiración en Adultos

Robert A Robergs², Chantal Vella¹ y Paulette M Yamada²

¹Exercise Physiology Laboratories/ University of Texas, El Paso, TX, Estados Unidos.

²Exercise Physiology Laboratories/ University of New Mexico, Albuquerque, NM, Estados Unidos.

RESUMEN

El objetivo de este estudio consistió en caracterizar la respuesta del costo de oxígeno de la ventilación (VO_{2VENT}) en condiciones de esfuerzo máximo y submáximo en varones y mujeres con diferentes niveles de aptitud física, tamaño corporal y edad y determinar cuales son los factores que contribuyen de manera significativa e independiente con el VO_{2VENT} máximo. En el estudio participaron veinte sujetos, 18 varones y 2 mujeres, saludables y no fumadores. Durante la primera visita al laboratorio, se realizó la determinación de la talla y masa corporal y se calculó el área de superficie corporal y el índice de masa corporal utilizando procedimientos estándar. Luego mediante un test de ciclismo incremental en bicicleta ergométrica, se determinaron la aptitud física (VO_2 máx.) y las tasas de ventilación submáxima y máxima. Durante la segunda visita al laboratorio, los sujetos simulaban tasas de ventilación submáximas y máximas en posición de ciclismo. Para caracterizar la respuesta del VO_{2VENT} al ejercicio incremental, se utilizó una curva de ajuste (regresión). Para determinar si características de los sujetos, tales como área de superficie corporal, masa corporal, índice de masa corporal, VO_2 máx. y ventilación máxima, se relacionaban de manera significativa e independiente con el VO_{2VENT} máximo se utilizó un test de regresión múltiple ($p < 0,001$). El área de la superficie corporal, masa corporal y la ventilación máxima fueron los factores que mayor contribución presentaron con el VO_{2VENT} máximo. Si bien pudo ser explicada aproximadamente el 60-70 % de la variación en el VO_{2VENT} , quedó sin explicar una gran proporción de variabilidad en el VO_{2VENT} entre los sujetos, lo cual merece ser investigado con detalle.

Palabras Clave: elasticidad pulmonar, trabajo de la respiración, potencia aeróbica

INTRODUCCION

En 1958, Bartlett y colegas (1) demostraron que el costo de oxígeno de la ventilación (VO_{2VENT}) se incrementaba exponencialmente a medida que aumentaba la ventilación hasta la intensidad máxima de un esfuerzo. Otros estudios observaron este mismo aumento curvilíneo en el costo de oxígeno (VO_2) en la ventilación, especialmente en la ventilación cuya tasa iba de moderada a máxima (2-4). La mayoría de estos trabajos preliminares se centraron en caracterizar el VO_{2VENT} entre los sujetos con enfermedades pulmonares obstructivas y controles saludables (3-5).

Recientemente, Aaron y colegas (6) utilizaron sujetos saludables para modelar la misma respuesta exponencial del VO_2 en relación con la ventilación durante el ejercicio máximo. Ellos informaron que el VO_{2VENT} aumentó exponencialmente con un incremento en la ventilación (V_E) a medida que la intensidad del ejercicio pasaba de media y moderada a máxima. Estos

autores también informaron que el VO_{2VENT} aumentó desproporcionadamente cuando aumentó la hiperpnea (7). Este aumento exponencial en VO_{2VENT} asociado al ejercicio máximo es ampliamente reconocido (1, 8). Trabajos adicionales han demostrado, usando datos empíricos y lógica, que el costo de oxígeno de la ventilación, en el VO_2 máx., alcanzaría el máximo en el 10-15% de VO_2 de todo el cuerpo, probablemente porque se estima que la perfusión máxima de los miembros sería el 80-85% del gasto cardíaco (6, 7, 9).

Es importante señalar que la mayoría de los trabajos que han estudiado el VO_{2VENT} , han considerado muestras de pequeño tamaño que van de cinco a doce sujetos (2, 7, 10-14). El tamaño de las muestras de las investigaciones realizadas en el pasado, que generalmente ha sido bajo, perjudica científicamente la categorización del VO_{2VENT} entre los niveles de aptitud cardiorrespiratoria (VO_2 máx.), y la gran variabilidad en el VO_{2VENT} plantea la pregunta acerca de ¿cuál es la causa o como se explica esta variabilidad?. Estas preguntas requieren que en diseño del estudio se tenga en cuenta una muestra de tamaño relativamente grande y se utilice la regresión múltiple para estimar el VO_{2VENT} a partir de un conjunto de variables independientes.

Es lógico proponer que hay muchos determinantes del VO_{2VENT} , que podrían estar constituidos por la magnitud de la ventilación y la eficacia mecánica de la ventilación. Así, la V_E máxima durante el ejercicio incremental debería ser el principal factor de estimación del VO_{2VENT} al alcanzar el VO_2 máx., como lo sería cualquier variable que aumente el trabajo realizado al respirar para una ventilación dada. Notablemente, McCool et al. (15) y Dempsey et al. (8) han sostenido que tasas elevadas de ventilación obligan a los pulmones a funcionar en un segmento menos favorable de la curva presión-volumen, que a su vez aumentaría el VO_{2VENT} .

Además, se ha planteado la hipótesis que el aumento en la edad aumenta el VO_{2VENT} debido a una reducción en el retroceso elástico del pulmón (16, 17).

Por lo tanto, es necesario contar con estudios que describan la respuesta del VO_{2VENT} en adultos saludables con diferentes niveles de aptitud física, tamaño corporal y edad. También, desde un punto de vista de la fisiología del ejercicio básica, es importante describir la relación entre el VO_{2VENT} máximo y las características de los sujetos. Por lo tanto, los objetivos de este estudio fueron: a) caracterizar la respuesta del VO_{2VENT} en adultos saludables con diferentes niveles de aptitud física, tamaño corporal y edad y b) determinar qué características de los sujetos se relacionan de manera independiente con el VO_{2VENT} durante el ejercicio de intensidad máxima. Nuestras hipótesis fueron: a) el VO_{2VENT} aumenta exponencialmente con V_E crecientes y b) las variables V_E máxima, tamaño corporal y aptitud física estarán relacionadas de manera independiente con el VO_{2VENT} máximo.

MÉTODOS

Sujetos

Veinte sujetos saludables (18 varones y 2 mujeres) participaron en este estudio. Ninguno fumaba ni tenía diagnosticada alguna enfermedad respiratoria o cardiovascular. No se permitió la participación de sujetos que hubieran sido previamente diagnosticados con asma inducido por el ejercicio, asma o infección respiratoria aguda de las vías superiores. El Comité de Revisión Institucional de la Universidad aprobó todos los procedimientos experimentales y cada sujeto dio su consentimiento de manera oral y escrita antes de realizar las evaluaciones. Las evaluaciones fueron realizadas a una altitud de 1572 m ($P_B=635$ mmHg).

Procedimientos

Antes de realizar los tests se realizó la determinación de la talla y masa de los sujetos y luego se calcularon el área de superficie corporal (BSA) (18) y el índice de masa corporal (BMI, $kg.m^2$). Luego los sujetos fueron familiarizados con la bicicleta ergométrica de carga constante (Excalibur Sport, Corval Lode B.V., Lode Medical Technology, Groningen, Países Bajos).

Para determinar el nivel de aptitud cardiorrespiratoria, la ventilación (V_E) y la tasa respiratoria (RR) de los sujetos durante el ejercicio máximo, se realizó un test de VO_2 máx. Luego de analizar los gases expirados en reposo durante 2 minutos, se realizó una entrada en calor de 2 minutos a una carga de trabajo equivalente al doble de la función de incremento en rampa por minuto del protocolo de ejercicio con incrementos específicos para cada sujeto (por ejemplo, 40 Watt para una función de incremento en rampa por minuto de 20 $Watt.min^{-1}$). Se utilizó un protocolo en rampa en el cual la carga de trabajo se incrementaba en 15-35 $Watt.min^{-1}$ (0,25-0,58 $Watt.s^{-1}$), dependiendo del nivel de aptitud física del sujeto, con la

idea de que el sujeto alcanzara la fatiga volitiva en un lapso de 10 a 14 minutos. La decisión de aplicar un protocolo en rampa se basó en un cuestionario oral que se realizó a los sujetos con respecto al entrenamiento, experiencia en ciclismo y aptitud física. Se solicitó a los sujetos que seleccionaran por sí mismos una cadencia por encima de las 60 rev.min⁻¹ y que mantuvieran esta cadencia en un intervalo de ± 5 rev.min⁻¹ durante el test. El criterio para establecer el fin del ejercicio fue que el participante no pudiera mantener la cadencia de 60 rev.min⁻¹ en la bicicleta ergométrica, o que expresara voluntariamente la fatiga. El consumo de oxígeno máximo fue definido como el valor más alto de VO₂ de un promedio de siete movimientos respiratorios.

Se realizó la medición del consumo de oxígeno (VO₂) respiración por respiración, producción de anhídrido carbónico (VCO₂), V_E y RR mediante una turbina de transducción de flujo de respuesta rápida (K.L. Engineering Model S-430, Van Nuys, CA) y un *software* diseñado a pedido (Lab view) con analizadores de gases (O₂ y CO₂) electrónicos (AEI Technologies, Model S-3A and Model CD-3H, Pittsburgh, PA). Específicamente, los sujetos respiraban a través de válvulas de sentido único en una bolsa elástica de mezcla de 3 L conectada a la turbina, que a su vez estaba conectada al puerto de expiración de la boquilla. El aire expirado de la bolsa de mezcla era bombeado continuamente a los analizadores de gases y se tomaron muestras durante 150 ms al final de cada expiración.

Antes de la recolección de los datos, se calibraron los analizadores de gases utilizando tres gases de concentraciones conocidas y la turbina de flujo fue calibrada con una jeringa de 3 litros (Hans Rudolph, Inc., Kansas City, MO). Las señales sin procesar, fueron registradas mediante una caja de unión e ingresadas a una computadora mediante una tarjeta de adquisición de datos (National Instruments, Austin, Texas). Todos los valores de VO₂ fueron informados en STPD y los valores de V_E fueron informados en BTPS. La frecuencia cardíaca fue continuamente supervisada (Quinton 4000, Quinton, Seattle, WA) y se registró en forma de promedio de 5 latidos a través de la integración electrónica con el *hardware* y *software* desarrollados a pedido.

Luego de dos días de haber realizado el test de ejercicios, y no antes, los sujetos regresaron al laboratorio para la determinación del VO_{2VENT}. Para obtener estos datos, se les solicitó que simularan nueve V_E diferentes (la V_E más baja y la más alta y siete V_E uniformemente distribuidas dentro del intervalo) que ellos habían experimentado durante el test de VO₂ máx. Los tests de simulación fueron realizados en la bicicleta ergométrica y manteniendo la misma posición adoptada durante el test de VO₂ máx. para eliminar las potenciales diferencias producidas por la postura, que alterarían tanto la V_E como la mecánica de la V_E (13). Estas pruebas fueron utilizadas para determinar el VO_{2VENT} a lo largo de diferentes tasas ventilatorias.

Se alcanzaron valores de ventilación y RR tan cercanos como fuera posible a los de la prueba de VO₂ máx., para asegurar que los sujetos imitaran la V_E real de su ejercicio (13). Se utilizó un metrónomo, comunicación verbal y una demostración por computadora de la V_E actualizada en cada respiración para comunicarse con los sujetos y permitir que asemejen la RR y V_E reales con la RR y V_E fijada. Se ha observado en estudios previos que estos procedimientos producen una V_E que tendría un volumen de flujo pulmonar y un circuito de presión, similares y que son característicos de la V_E del ejercicio (13). Antes de la prueba, se recolectaron los datos de la línea de base durante dos minutos. Luego, los sujetos realizaron varios intentos prácticos durante algunos segundos para alcanzar la V_E deseada. Los sujetos ventilaron en la V_E deseada durante 3 a 5 minutos. Para mantener los niveles de CO₂ al final de la expiración y para evitar la hipocapnea, se agregó CO₂ al gas de inspiración (FICO₂=3-5%) (12) y luego esto fue considerado al momento de realizar los cálculos de calorimetría indirecta. El porcentaje de CO₂ en el final de la inspiración fue determinado en cada expiración por la boca mediante un sistema de capnografía de respuesta rápida Colin Pilot-9200 (Colin Medical Instruments, San Antonio, TX). Los datos del capnógrafo fueron registrados a 250 Hz con un sistema de adquisición de datos BIOPAC (MP100 hardware & Acknowledge software version 3,5.3. para Windows, BIOPAC Systems, Inc, Santa Barbara, CA). Durante esta prueba, se midió el consumo de oxígeno con el mismo equipo y de la misma manera en que fue previamente descrito.

En cada prueba ventilatoria, se promediaron y graficaron los últimos 30 segundos de VO_{2VENT} en estado estable (Prism[®], Graphpad[™] Software, Inc. versión 3.0, San Diego, CA). Todos los sujetos alcanzaron el estado estable, definido como una desviación en el VO₂ menor a 25 mL O₂.min⁻¹, en este lapso de 30 segundos, tal como se determinara por la pendiente de la recta de regresión lineal. Por convención, el VO_{2VENT} total fue luego corregido por el VO₂ del reposo con una constante de 0,3 L.min⁻¹ (VO_{2VENT}) y expresado en función de VO₂ máx.

Análisis Estadísticos

Los datos de VO_{2VENT} correspondientes a cada sujeto y a todos los sujetos en forma de grupo, fueron graficados en función de la V_E y para determinar el tipo de respuesta de VO_{2VENT} a lo largo de las tasas de V_E submáximas a máximas, se aplicó una curva de ajuste no lineal (regresión). Las diferencias entre los valores medios del porcentaje de CO₂ al final de la expiración de las pruebas de VO₂ máx. y de simulación de V_E, fueron valoradas mediante un test-t de muestras dependientes. Esto fue realizado para asegurar que los valores de CO₂ eran similares entre las pruebas, debido a que se

sabe que el CO_2 influye en la V_E .

Se utilizó un análisis de correlación de Pearson para establecer las relaciones entre el $\text{VO}_{2\text{VENT}}$ máximo y la masa corporal, BSA, BMI, VO_2 máx., V_E máxima determinada, V_E máxima simulada, y el equivalente ventilatorio máximo ($V_E \cdot \text{VO}_2^{-1}$). Se realizaron análisis de regresión lineal multivariada para establecer las contribuciones independientes de la masa corporal, BSA, BMI, VO_2 máx., V_E máxima determinada y V_E máxima simulada después de los ajustes para edad y sexo. Se sabe que la edad y el sexo (16, 17, 19) afectan el $\text{VO}_{2\text{VENT}}$ en personas saludables; por lo tanto, fueron utilizados como covariables en los modelos de regresión.

Debido a que el $\text{VO}_{2\text{VENT}}$ tiene una respuesta curvilínea a medida que se incrementa la V_E , previamente se analizó la normalidad de los datos de $\text{VO}_{2\text{VENT}}$. El test de Shapiro-Wilk para normalidad de los datos reveló que estos datos no seguían una distribución normal ($W=0,901$, $p < 0,05$). Luego de realizar la transformación de los datos de $\text{VO}_{2\text{VENT}}$ mediante la aplicación de la función "log", se corroboró la distribución normal de los mismos ($W=0,947$, $p > 0,05$). Así, el log del $\text{VO}_{2\text{VENT}}$ máximo expresado en $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ fue utilizado como variable dependiente (log de $\text{VO}_{2\text{VENT}}$). Las variables independientes fueron la masa corporal, BSA, BMI, VO_2 máx., V_E máxima determinada, V_E máxima simulada, y $V_E \cdot \text{VO}_2^{-1}$ máximo. Todos los análisis fueron realizados con el software SPSS versión 15.0 (SPSS Inc., Chicago, IL) con el error de Tipo I fijado en $p < 0,05$.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se presentan las características descriptivas de los sujetos. Los valores de porcentaje promedio de CO_2 al final de la espiración fueron similares en el test de VO_2 máx. y en el de simulación de V_E ($36,9 \pm 5,4\%$ versus $32,7\% \pm 2,5\%$, $p > 0,05$). El $\text{VO}_{2\text{VENT}}$ aumentó exponencialmente desde la V_E submáxima a la máxima en los datos de los sujetos individuales y en los datos de los 20 sujetos agrupados (Figura 1). El $\text{VO}_{2\text{VENT}}$ máximo promedio en esta muestra fue 7,2% del VO_2 máx. y tomó valores comprendidos entre 3,6 y 13,4%.

Variables	Media	SE
Edad (años)	29,65	1,37
Talla (cm)	177,91	2,23
Masa corporal (kg)	75,34	3,37
BSA (m^2)	2,20	0,06
BMI ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	23,62	0,70
VO_2 máx. ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	4,25	0,23
$V_E \cdot \text{VO}_2^{-1}$ máximo	30,15	1,07
V_E BTPS ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$) máxima determinada	176,75	7,95
V_E BTPS ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$) máxima simulada	160,25	9,08
$\text{VO}_{2\text{VENT}}$ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$) Máximo	0,62	0,04
$\text{VO}_{2\text{VENT}}/\text{VO}_2$ máx. (%)	7,15	0,01

Tabla 1. Características de los sujetos ($n=20$). SE, error estándar; BSA, área de superficie corporal; BMI, Índice de masa corporal; VO_2 máx., consumo de oxígeno máximo; $V_E \cdot \text{VO}_2^{-1}$, equivalente ventilatorio; V_E , ventilación; BTPS, temperatura y presión corporales saturadas; $\text{VO}_{2\text{VENT}}$, costo de oxígeno de la ventilación máximo determinado mediante la prueba de simulación; $\text{VO}_{2\text{VENT}}$, $\text{VO}_{2\text{VENT}}$ total menos el VO_2 en reposo.

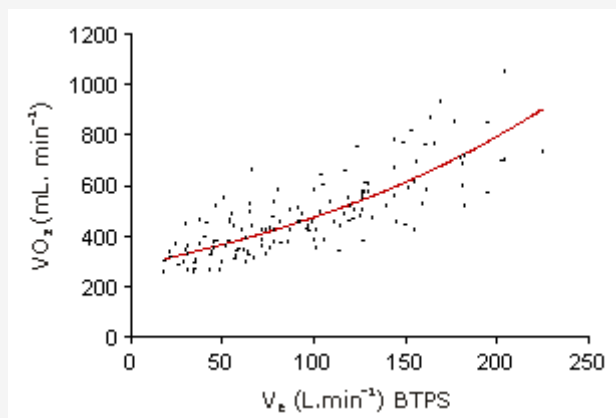


Figura 1. Datos correspondientes al costo de oxígeno de la ventilación (VO_{2VENT}) determinados en todos los sujetos a partir de las tasas de ventilación submáximas y máximas simuladas. La curva de ajuste fue trazada siguiendo el modelo exponencial.

Correlaciones Simples entre el VO_{2VENT} Máximo y las Características de los Sujetos

El VO_{2VENT} máximo presentó una correlación positiva con la masa corporal ($p < 0,001$), BSA ($p < 0,001$), BMI ($p = 0,01$), VO_2 máx. ($p < 0,001$), V_E máxima determinada ($p < 0,001$) y V_E máxima simulada ($p < 0,001$). No se observó una correlación entre el $V_E \cdot VO_2^{-1}$ máximo y el VO_{2VENT} máximo ($p = 0,70$) (Tabla 2).

Variable Independiente	Coefficiente de Correlación
Masa Corporal	0,814*
BSA	0,851*
BMI	0,563*
VO_2 máx.	0,726*
V_E máxima determinada	0,798*
V_E máxima simulada	0,805*
$V_E \cdot VO_2^{-1}$ máxima	-0,090

Tabla 2. Coeficientes de correlación (r) entre los valores de "log de VO_{2VENT} máximo" (datos de VO_{2VENT} máximo transformados con la función log) y las variables independientes. VO_{2VENT} , costo de oxígeno de la ventilación; BSA, área de superficie corporal; BMI, índice de masa corporal; VO_2 máx., consumo de oxígeno máximo; V_E ventilación; $V_E \cdot VO_2^{-1}$, equivalente ventilatorio; * $p < 0,01$.

Contribuciones Independientes de las Características de los Sujetos en el VO_{2VENT} máximo

En la Tabla 3 se presentan las contribuciones independientes de masa corporal, BSA, BMI, VO_2 máx., V_E máxima determinada, y V_E máxima simulada en el VO_{2VENT} máximo. La masa corporal ($p < 0,001$), BSA ($p < 0,001$), BMI ($p = 0,026$), VO_2 máx. ($p = 0,004$), V_E máxima determinada ($p < 0,001$) y V_E máxima simulada ($p < 0,001$) tuvieron una relación positiva e independiente con el log de VO_{2VENT} máximo ($p < 0,01$), cuando la edad y sexo fueron utilizadas como covariables en los modelos. El $V_E \cdot VO_2^{-1}$ máximo no estuvo relacionado de manera independiente con el log de VO_{2VENT} máximo ($p > 0,05$, datos no presentados). El área de superficie corporal, la masa corporal y la V_E máxima simulada y determinada, fueron los factores independientes de estimación del VO_{2VENT} más fuertes, ya que explicaron el 73%, 68%, 66% y 64% de la variación en el VO_{2VENT} máximo, respectivamente (Tabla 3).

Variable	R	R ²	Valor Beta Estandarizado	Valor-p
Modelo 1				
Masa Corporal	0,826	0,682	0,772	< 0,001
Edad			-0,094	NS
Sexo			-0,099	NS
Modelo 2				
BSA	0,856	0,733	0,814	<0,001
Edad			-0,052	NS
Sexo			-0,077	NS
Modelo 3				
BMI	0,648	0,419	0,504	0,026
Edad			-0,152	NS
Sexo			-0,268	NS
Modelo 4				
VO ₂ max	0,727	0,528	0,711	0,004
Edad			-0,029	NS
Sexo			-0,020	NS
Modelo 5				
V _E máxima determinada	0,800	0,640	0,840	<0,001
Edad			-0,011	NS
Sexo			0,071	NS
Modelo 6				
V _E máxima simulada	0,814	0,663	0,859	<0,001
Edad			-0,108	NS
Sexo			0,089	NS

Tabla 3. Relaciones independientes entre el VO_{2VENT} máximo y las características de los sujetos considerando la edad y sexo como covariables. VO_{2VENT}, consumo de oxígeno de la ventilación; NS, no significativo, BSA área de superficie corporal; BMI, índice de masa corporal; VO₂ máx., máximo consumo de oxígeno; V_E, ventilación.

En las Figuras 2 y 3 se presentan los datos de VO_{2VENT} de los sujetos con valores de BSA y tasas de V_E más extremos en función de las tasas ventilatorias submáximas y máximas. Se presentan los sujetos con los resultados más extremos para dar énfasis al efecto del tamaño corporal y la V_E máxima sobre la respuesta del VO_{2VENT} al ejercicio incremental.

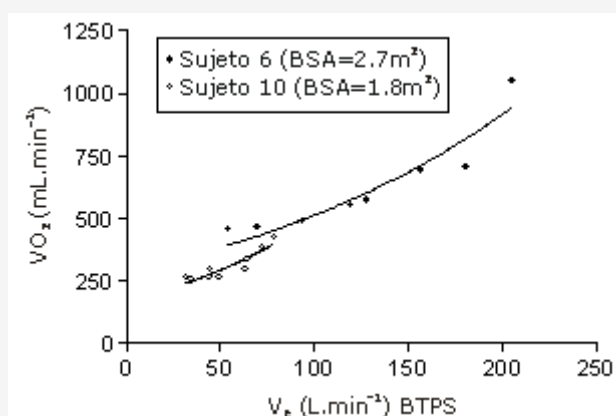


Figura 2. Datos correspondientes al VO_{2VENT} para todos los sujetos con los valores más bajos y más altos de BSA en función de las tasas de ventilación submáximas y máximas, La curva de ajuste fue trazada siguiendo el modelo exponencial.

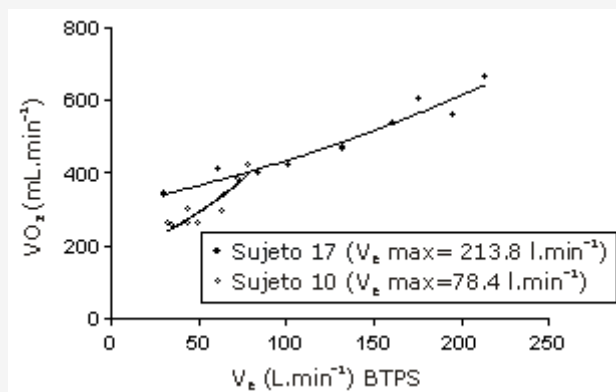


Figura 3. Datos correspondientes al VO_{2VENT} de los sujetos con valores más bajos y más altos de V_E en función de la V_E submáxima y máxima. La curva de ajuste fue trazada siguiendo el modelo exponencial.

DISCUSION

El propósito de este estudio fue doble. El primer objetivo consistió en caracterizar la respuesta del VO_{2VENT} en una muestra de adultos saludables con diferentes niveles de aptitud física, tamaños corporales y edades. El segundo objetivo fue determinar si las asociaciones entre el VO_{2VENT} máximo y la masa corporal, BSA, BMI, VO_2 máx., V_E máxima medida y simulada eran independientes de la edad y sexo, dos de los factores que se sabe que afectan el VO_{2VENT} (16, 17, 19). Nuestros resultados demuestran que el VO_{2VENT} aumentó exponencialmente desde la V_E submáxima a la máxima en todos los sujetos y que BSA, masa corporal, BMI, VO_2 máx., V_E máxima determinada y simulada, estaban todos relacionados de manera positiva e independiente con el VO_{2VENT} máximo.

En el estudio actual, el intervalo de VO_{2VENT} en el ejercicio máximo correspondió al 3,6 a 13,4% del VO_2 máx. Estos resultados son consistentes con lo observado por Aaron et al. (6), quienes informaron que el VO_{2VENT} en el ejercicio máximo requiere 10-15% del VO_2 . Mientras que el límite superior observado en este estudio es comparable con el obtenido en investigaciones previas, el límite inferior de 3,6% informado en el presente estudio es mucho menor que el que ha sido previamente informado. El intervalo de VO_{2VENT} máximo obtenido en el presente estudio es 8 % mayor que el intervalo informado por Aaron et al. (6). Esto puede atribuirse a que en el presente estudio se consideró una muestra de mayor tamaño y por lo tanto la variabilidad en el VO_{2VENT} máximo fue mayor.

Dado que nuestros datos fueron recolectados en condiciones de altitud moderada (1572 m sobre el nivel del mar), existe la posibilidad de que la hipoxia leve y la menor densidad del aire hayan alterado nuestros resultados en comparación con lo que ocurre al nivel del mar. La densidad del aire disminuye a medida que aumenta la altitud. Nosotros hemos podido establecer que esta variación de densidad, entre el nivel del mar y una altura de 1572 m, para el aire seco a 37°C sería de 1,139 a 0,937 kg.m⁻³ un 17,7% de disminución. Lamentablemente no hay investigaciones acerca del VO_{2VENT} realizadas en altitud baja a moderada. Mazess (20) observó una disminución en el VO_{2VENT} durante la exposición aguda a 4000 m, pero esta aclimatación a elevada altitud provocó un aumento en el VO_{2VENT} en comparación con los valores observados en la línea de base (nivel del mar), probablemente debido al aumento en la perfusión pulmonar y a la disminución resultante en la elasticidad pulmonar. En relación con el consumo de oxígeno de la ventilación durante el ejercicio en condiciones de hipoxia severa, la hiperventilación de la hipoxia provoca un mayor costo energético para la ventilación para cualquier carga de ejercicio (21). Por consiguiente, debido a que la disminución en la densidad del aire era pequeña y a que utilizamos residentes aclimatados a altitud baja a moderada, es improbable que nuestros resultados hayan sido influenciados por la altitud.

Según nuestros conocimientos, éste es el primer estudio que investigó los factores que contribuyen de manera independiente con el VO_{2VENT} máximo. El tamaño corporal, determinado a través del BSA, BMI, y masa corporal se relacionó significativa e independientemente con el VO_{2VENT} máximo. La función principal de los pulmones es intercambiar el dióxido de carbono por oxígeno; por lo tanto, concentraciones más elevadas del metabolito demandarán mayores ventilaciones. Una persona grande con una gran masa corporal exhibirá típicamente volúmenes pulmonares y ventilaciones más altos. De los tres parámetros de medición del tamaño corporal, el BSA presentó el mayor valor beta estandarizado obtenido a través de la regresión múltiple (0,814, Tabla 3) y explicó aproximadamente el 73% de la variación en el VO_{2VENT} máximo, lo que

sugiere que el BSA puede ser un contribuyente importante del VO_{2VENT} máximo.

La relación positiva entre la V_E máxima determinada y simulada y el VO_{2VENT} máximo puede ser explicada por los elevados requerimientos de energía en las ventilaciones grandes. La energía requerida para la inspiración aumenta de manera no lineal a tasas de flujo altas, a medida que el flujo se pone turbulento (8). La energía requerida para la inspiración también se incrementa de manera no lineal a medida que se incrementa la velocidad de contracción del músculo respiratorio con un aumento en la RR (15) y a medida que un mayor volumen tidal obliga al pulmón a trabajar en un segmento menos flexible de la curva de presión-volumen (8, 15). De esta manera, es esperable observar una relación directa entre VO_{2VENT} máximo y V_E cuando se realizan esfuerzos máximos.

Los individuos con potencia aeróbica superior alcanzan tasas V_E más altas para cumplir con las mayores demandas de oxígeno durante el ejercicio máximo, que los individuos con potencia aeróbica promedio o baja. Por consiguiente, se espera que los individuos con un VO_2 máx. más alto presenten VO_{2VENT} máximos mayores que los sujetos con VO_2 máx. más bajo. Nuestros resultados demuestran que el VO_2 máx. se relacionó de manera independiente con el VO_{2VENT} máximo y explicó aproximadamente el 53% de la variación en el VO_{2VENT} máximo. Por otra parte se ha demostrado que el entrenamiento de resistencia limitado a los músculos ventilatorios, aumenta la V_E máxima y el VO_{2VENT} máximo en un 19% y 67%, respectivamente (2). Por consiguiente, los sujetos con poca aptitud física, que realizan entrenamiento de los músculos respiratorios pueden tener un VO_{2VENT} máximo alto sin tener un VO_2 máx. alto. Aunque el VO_2 máx. se relacionó independientemente con el VO_{2VENT} máximo, nuestros datos sugieren que el tamaño corporal y la V_E máxima pueden ser más importantes que el VO_2 máx. en la determinación del VO_{2VENT} máximo.

Nuestros datos también demuestran que el $V_E \cdot VO_2^{-1}$ máximo no presentó una correlación con el VO_{2VENT} máximo. El $V_E \cdot VO_2^{-1}$ máximo representa la eficiencia del cuerpo para utilizar el oxígeno en relación con la tasa de V_E , mientras que el VO_{2VENT} representa el uso del oxígeno por parte de los músculos ventilatorios.

Por lo tanto, un individuo con un $V_E \cdot VO_2^{-1}$ más bajo (utiliza más oxígeno por litro de ventilación) sería más eficaz que un individuo con un $V_E \cdot VO_2^{-1}$ más alto. Es lógico suponer que un individuo con un elevado $V_E \cdot VO_2^{-1}$ máximo también tendría un elevado VO_{2VENT} máximo; sin embargo, nuestros datos no muestran una relación entre estas variables.

La falta de una relación entre estas variables sugiere que el VO_{2VENT} máximo puede no estar relacionado con la eficiencia de todo el cuerpo para captar oxígeno y/o con la respuesta relativa de hiperventilación frente al ejercicio incremental. Para poder establecer con claridad esta relación en adultos saludables, es necesario realizar investigaciones adicionales con muestras de sujetos de mayor tamaño.

Las Figuras 2 y 3 muestran los efectos de las diferencias en el tamaño corporal y V_E máxima sobre el VO_{2VENT} en función de la tasas de V_E . En la Figura 2, el sujeto 6 tenía el mayor BSA (2,7 m²) y el sujeto 10 tenía el BSA más pequeño (1,8 m²). Estos sujetos también eran el más pesado (113,6 kg) y más liviano (50,8 kg) del estudio, respectivamente. El sujeto 6 presentó una V_E submáxima y máxima mayores que las del sujeto 10 y por lo tanto el sujeto 6 tenía un mayor VO_{2VENT} en el ejercicio máximo. De hecho, el VO_{2VENT} del sujeto 10 en el ejercicio máximo se acercó al VO_{2VENT} del sujeto 6 en la ventilación submáxima.

La Figura 3 muestra una respuesta de VO_{2VENT} similar en los sujetos con los niveles de V_E máximos más altos y más bajos. Los sujetos 17 y 10 presentaron ventilaciones máximas de 213,8 L.min⁻¹ y 78,4 L.min⁻¹, respectivamente. Nuevamente, el VO_{2VENT} máximo del sujeto 10 se aproximó al VO_{2VENT} del sujeto 17 en las ventilaciones submáximas. Estos datos en conjunto, sugieren que diferencias en el tamaño corporal y en la tasa ventilatoria máxima puede explicar la gran variabilidad entre sujetos en el VO_{2VENT} máximo.

Esta gran variabilidad entre sujetos justifica la necesidad de realizar investigaciones adicionales que incorporen muestras de mayor tamaño de sujetos saludables, no fumadores.

Es necesario destacar que las relaciones demostradas en este estudio son específicas del ciclismo, porque la simulación de la hiperventilación producida en el VO_2 máx. probablemente no refleje la activación fásica y tónica de los músculos abdominales y de la caja torácica que se produce durante la carrera (8).

Conclusiones

En síntesis, nuestros datos demostraron que el VO_{2VENT} aumentó exponencialmente desde una V_E submáxima a máxima en todos los sujetos y que el BSA, masa corporal, BMI, VO_2 máx. y V_E máxima determinada y simulada, se relacionaban positiva e independientemente con el VO_{2VENT} máximo. En esta muestra la masa corporal, BSA y V_E máxima fueron los factores independientes más fuertes de contribución para el VO_{2VENT} máximo. Nuestros datos sugieren que los individuos de gran tamaño con altas tasas de ventilación máximas pueden tener valores de VO_{2VENT} máximo más altos que los individuos

pequeños con tasas de ventilación máximas más bajas. Sin embargo, estas relaciones pueden ser afectadas por las diferencias en la composición corporal entre los individuos, un área que todavía debe ser estudiada. En esta muestra la masa corporal, BSA, y V_E máxima fueron los responsables de más del 60% de la variación observada en el $VO_{2\text{VENT}}$ máximo, la gran variabilidad entre sujetos que no ha podido ser explicada demuestra que se necesitan estudios adicionales en el área.

Dirección para Envío de Correspondencia

Chantal A. Vella, PhD., Kinesiology Department, University of Texas, El Paso, TX 79902. Teléfono: (915) 747-8228; Fax: (915) 747-8211; correo electrónico: cvella@utep.edu.

REFERENCIAS

1. Bartlett R. G., Jr., Brubach H. F., Specht H (1958). Oxygen cost of breathing. *J Appl Physiol* 12: 413-24
2. Bradley M. E., Leith D. E (1978). Ventilatory muscle training and the oxygen cost of sustained hyperpnea. *J Appl Physiol* 45: 885-92
3. Campbell E. J., Westlake E. K., Charniack R. M (1957). Simple methods of estimating oxygen consumption and efficiency of the muscles of breathing. *J Appl Physiol* 11: 303-8
4. McKerrow C. B., Otis A. B (1956). Oxygen cost of hyperventilation. *J Appl Physiol* 9: 375-9
5. Gregor M., Becklake M. R (1961). The relationship of oxygen cost of breathing to respiratory mechanical work and respiratory force. *J Clin Invest* 40: 971-80
6. Aaron E. A., Seow K. C., Johnson B. D., Dempsey J. A (1992). Oxygen cost of exercise hyperpnea: implications for performance. *J Appl Physiol* 72: 1818-25
7. Aaron E. A., Johnson B. D., Seow C. K., Dempsey J. A (1992). Oxygen cost of exercise hyperpnea: measurement. *J Appl Physiol* 72: 1810-7
8. Dempsey J. A., Harms C. A., Ainsworth D. M (1996). Respiratory muscle perfusion and energetics during exercise. *Med Sci Sports Exerc* 28: 1123-8
9. Rowell L. B (1993). Human Cardiovascular Control. *New York: Oxford University Press*
10. Harms C. A., Wetter T. J., St. Croix C. M., Pegelow D. F., Dempsey J. A (2000). Effects of respiratory muscle work on exercise performance. *J Appl Physiol* 89: 131-8
11. Anholm J. D., Johnson R. L., Ramanathan M (1987). Changes in cardiac output during sustained maximal ventilation in humans. *J Appl Physiol* 63: 181-7
12. Coast J. R., Krause K. M (1993). Relationship of oxygen consumption and cardiac output to work of breathing. *Med Sci Sports Exerc* 25: 335-40
13. Coast J. R., Rasmussen S. A., Krause K. M., O'Kroy J. A., Loy R. A., Rhodes J (1993). Ventilatory work and oxygen consumption during exercise and hyperventilation. *J Appl Physiol* 74: 793-8
14. Harms C. A., Wetter T. J., McClaran S. R., Pegelow D. F., Nickle G. A. et al (1998). Effects of respiratory muscle work on cardiac output and its distribution during maximal exercise. *J Appl Physiol* 85: 609-18
15. McCool F. D., McCann D. R., Leith D. E., Hoppin F. G., Jr (1986). Pressure-flow effects on endurance of inspiratory muscles. *J Appl Physiol* 60: 299-303
16. Johnson B. D., Reddan W. G., Seow K. C., Dempsey J. A (1991). Mechanical constraints on exercise hyperpnea in a fit aging population. *Am Rev Respir Dis* 143: 968-77
17. McClaran S. R., Babcock M. A., Pegelow D. F., Reddan W. G., Dempsey J. A (1995). Longitudinal effects of aging on lung function at rest and exercise in healthy active fit elderly adults. *J Appl Physiol* 78: 1957-68
18. DuBois D., DuBois E. F (1916). A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch Int Med* 17: 863-71
19. Topin N., Mucci P., Hayot M., Prefaut C., Ramonatxo M (2003). Gender influence on the oxygen consumption of the respiratory muscles in young and older healthy individuals. *Int J Sports Med* 24(8): 559-564
20. Mazess R. B (1968). The oxygen cost of breathing in man: effects of altitude, training, and race. *Am J Phys Anthropol* 29: 365-75
21. Cibella F., Cuttitta G., Romano S., Grassi B., Bonsignore G. et al (1999). Respiratory energetics during exercise at high altitude. *J Appl Physiol* 86: 1785-92

Cita Original

Vella, C.A., Robergs R.A., Yamada P.M. Fitness, body size, ventilation and the oxygen cost of breathing in adults. *JEPonline*; 11 (6): 67-76, 2008.