

Evaluaciones en fisiología del ejercicio: razón de intercambio respiratorio

Assessments in exercise physiology: respiratory exchange ratio

Martin Bruzzese¹,
ORCID: 0000-0002-3169-3386

Nelio Bazán².
ORCID: 0000-0003-3225-5721

REVISIÓN

¹ Futbolistas Argentinos Agremiados, Buenos Aires, Argentina.

² Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.

RESUMEN

Objetivo: Profundizar en el conocimiento de esta variable permitiendo así enriquecer la interpretación del resultado de la prueba de esfuerzo cardiorrespiratoria.

Método: Se efectuó una revisión bibliográfica en las bases de datos on-line en los ámbitos de las áreas de la salud y la fisiología: PubMed, HINARI, AccessMedicine, EBSCO; e-Libro, MedOne, Elsevier, Springer, ScienceDirect, y utilizando como palabras claves en inglés: respiratory exchange ratio, oxygen consumption, carbon dioxide production, stress test, energy substrate.

Conclusiones: El RER refleja el metabolismo muscular donde un valor de ~0,7 indica que los lípidos son la fuente predominante de energía, o bien proteínas, si el valor es de 0,8 a 0,9, y de carbohidratos cuando es 1,0. El valor 0,8 es habitual y es producto de un valor promedio basado en una dieta mixta. En una prueba de esfuerzo graduada, un aumento en el RER de 0,8 a 1,0 refleja el aumento del predominio del metabolismo glucolítico sobre el oxidativo. Los valores superiores a 1,0 indican la acción buffer sobre los H⁺ y, en consecuencia, hiperventilación debido al incremento en la producción de CO₂, correspondiente a VT2. Así es que el RER 1,0 puede usarse como un método alternativo individual para detectar el VT2.

Keywords: Razón de intercambio respiratorio, consumo de oxígeno, producción de dióxido de carbono, prueba de esfuerzo, sustrato energético.



RPCAFD

Recibido: 15-04-2022
Aceptado: 02-06-2022

Correspondencia:

Nelio Bazan,

Email:

nelio.bazan@gmail.com



Abstract

Objective: To deepen the knowledge of this variable, thus allowing to enrich the interpretation of the result of the cardiorespiratory stress test.

Method: A literature review was carried out in online databases in the areas of health and physiology: PubMed, HINARI, AccessMedicine, EBSCO; e-Libro, MedOne, Elsevier, Springer, ScienceDirect, and using as keywords in English: respiratory exchange ratio, oxygen consumption, carbon dioxide production, stress test, energy substrate.

Conclusions: RER reflects muscle metabolism where a value of ~ 0.7 indicates that lipids are the predominant source of energy, or proteins, if the value is 0.8 to 0.9, and carbohydrates when it is 1.0. The value 0.8 is typical and is the product of an average value based on a mixed diet. In a graded stress test, an increase in RER from 0.8 to 1.0 reflects the increased predominance of glycolytic over oxidative metabolism. Values greater than 1.0 indicate the buffering action on H^+ and, consequently, hyperventilation due to the increase in CO_2 production, corresponding to VT2. Thus, RER 1.0 can be used as a single alternative method to detect VT2.

Keywords: Respiratory exchange ratio, oxygen consumption, carbon dioxide production, stress test, energy substrate.

Introdução

La respiración es el proceso por el cual se libera energía de los enlaces químicos de las moléculas de los alimentos, y se proporciona esa energía para procesos vitales. El *cociente respiratorio* (RQ) es el volumen de dióxido de carbono (CO_2) liberado sobre el volumen de oxígeno (O_2) absorbido durante la respiración. Es un número adimensional, ya que en una razón si el antecedente y el consecuente comparten la misma unidad, se pueden expresar de este modo. Se mide directamente en el tejido, requiriendo un catéter arterial y uno venoso¹.

La razón de intercambio respiratorio o *respiratory exchange ratio* (RER) es la relación entre la producción de CO_2 y el consumo de O_2 . Se mide de un modo menos invasivo, tomando en cuenta el volumen de CO_2 liberado (VCO_2) / el volumen de O_2 (VO_2) absorbido en la boca utilizando los gases ventilados. La RER en reposo es un buen predictor de RQ, aunque se pierde esta capacidad cuando se supera el umbral ventilatorio (AT) durante el ejercicio intenso. El RER refleja la misma proporción de sustrato que se utiliza para la producción de energía que RQ (0,7 - 1,0), sin embargo, el RER puede exceder 1,0, a diferencia del RQ, debido al CO_2 extra que se mide durante los procesos exhalatorios².

Este cociente proporciona información sobre la contribución relativa de carbohidratos (CHO) y lípidos (LIP) al gasto energético general. Las moléculas que están más oxidadas (por ejemplo, glucosa) requieren menos oxígeno para ser completamente metabolizadas y, por lo tanto, tienen cocientes respiratorios más altos y las menos oxidadas (por ejemplo, ácidos grasos) requieren más oxígeno para su metabolismo completo y tienen cocientes respiratorios más bajos. Entonces el RER refleja el metabolismo muscular donde un valor de $\sim 0,7$ indica que los LIP son la fuente de energía.

Estas pueden ser cetonas (estado eucalórico): 0,73, cetonas (estado hipocalórico): 0,66, trioleína: 0,7, ácido oleico: 0,71, tripalmitina: 0,7, o bien, corresponder a proteínas 0,8 - 0,9, y llegar a 1,0 cuando la fuente energética es solo CHO³. Las variaciones en los equivalentes calóricos de diferentes grasas, carbohidratos y fuentes de proteínas pueden ignorarse porque el error producido es muy pequeño⁴. Habitualmente se encuentra un registro de 0,8 lo cual es producto de una dieta mixta que promedia los valores. En una prueba de esfuerzo graduada, un aumento en el RER de 0,8 a 1,0 refleja el aumento del predominio del metabolismo glucolítico⁵ sobre el oxidativo. Al interpretar estos cambios en los procesos metabólicos se debe tener en cuenta que

el comportamiento de los cambios del oxígeno y dióxido de carbono son de diferente magnitud. El almacenamiento de O_2 es muy limitado y el del CO_2 es amplio debido al almacenamiento como bicarbonato. En función del tiempo, el VCO_2 es ligeramente menor que el VO_2 durante la primera parte de la prueba, es decir, con un $RER < 1$.

Los equipos analizadores de gases calculan el RER y este es usado en las pruebas de consumo de oxígeno para estimar sustrato e intensidad del ejercicio, sin embargo, su interpretación puede brindar una gran cantidad de información que puede ser tenida en cuenta para mejorar la interpretación del test. Se realizó un estudio bibliográfico que se propuso identificar los aportes que puede hacer la interpretación del RER en las pruebas de esfuerzo. Así, el presente trabajo intenta hacer una profundización de este aspecto de los tests de consumo de oxígeno y producción de dióxido de carbono, interpretando que el mayor conocimiento de esta variable permite enriquecer la interpretación de los resultados del test cardiorrespiratorio. A estos efectos, la búsqueda bibliográfica fue efectuada en las bases de datos on-line en los ámbitos de las áreas de la salud y la fisiología: PubMed, HINARI, AccessMedicine, EBSCO; e-Libro, MedOne, Elsevier, Springer, ScienceDirect, y utilizando como palabras clave en inglés: respiratory exchange ratio, oxygen consumption, carbon dioxide production, stress test, energy substrate. Se consideraron tanto estudios y libros que abarcaran la historia del inicio de las pruebas de valoración como aquellos trabajos actuales.

RER y metabolismo energético

Si bien a principios del siglo pasado existía una gran controversia sobre el uso de LIP y CHO como fuentes de energía⁶ los experimentos realizados en la década de 1920 demostraron que ambos son oxidados por el músculo durante el ejercicio submáximo y que el tipo de dieta influye en el metabolismo muscular tanto en reposo, en el estado post-absorción, como durante el ejercicio, y que hay una baja tolerancia al ejercicio cuando los LIP son el principal combustible. También determinaron que aumentan los valores de RER en función de la intensidad del ejercicio, cambiando hacia una mayor dependencia de CHO como fuente de energía⁷.

Las células producen menos CO_2 que el O_2 que consumen, particularmente si están metabolizando LIP en lugar de glucosa. Además, recordemos que el CO_2 se disuelve en agua y se convierte en bicarbonato (HCO_3^-) y es excretado por los riñones. No hay una alternativa similar para O_2 . La capacidad de amortiguación (buffer) del sistema HCO_3^- es mucho mayor que la disponible para O_2 , por lo que cualquier cambio en el CO_2 tiene un efecto mucho más lento en los niveles en la sangre que en el caso de O_2 ⁸. Por ello hay una latencia entre los cambios que ocurren en el nivel celular y los ventilatorios. En definitiva, se deben interpretar con precaución los valores de los gases cuando las condiciones sean diferentes a un estado estacionario⁹.

Para sostener la homeostasis el organismo obtiene energía de forma continua, la mayor parte por vías metabólicas que producen compuestos fosforilados con aporte continuo de O_2 y generan CO_2 como parte del proceso metabólico (fosforilación oxidativa). En la Figura 1 se muestran los diferentes sustratos que pueden integrar estas vías (Glucosa, AGL, lactato) y se esquematizan sus relaciones.

Así es posible ver que prácticamente la totalidad del CO_2 es generado por el metabolismo oxidativo tisular a nivel mitocondrial y el glucógeno y los TG intramusculares son los combustibles primarios utilizados. El flujo de carbono de estas fuentes está vinculado al VO_2 por la formación de equivalentes reducidos, $FADH_2$ y $NADH$, y su utilización por la cadena de transporte de electrones (CTE). Cuando predomina la oxidación de LIP, en un ejercicio ligero, por ejemplo, la lipólisis de TG y la beta oxidación se activan rápidamente. Siendo el proveedor dominante de $FADH_2$ y $NADH$ a la CTE y la formación de acetil CoA para su ingreso al ciclo del ácido tricarboxílico (ATC). La oxidación de TG tiene control de retroalimentación sobre la glucogenólisis (a través del citrato) atenuando la activación del complejo de la piruvato deshidrogenasa (PDH) a través del acetil CoA y el $NADH$. Los aumentos en las relaciones el $NADH/NAD$ y acetil CoA/CoA por la oxidación de TG, inciden sobre la activación del complejo PDH¹⁰.

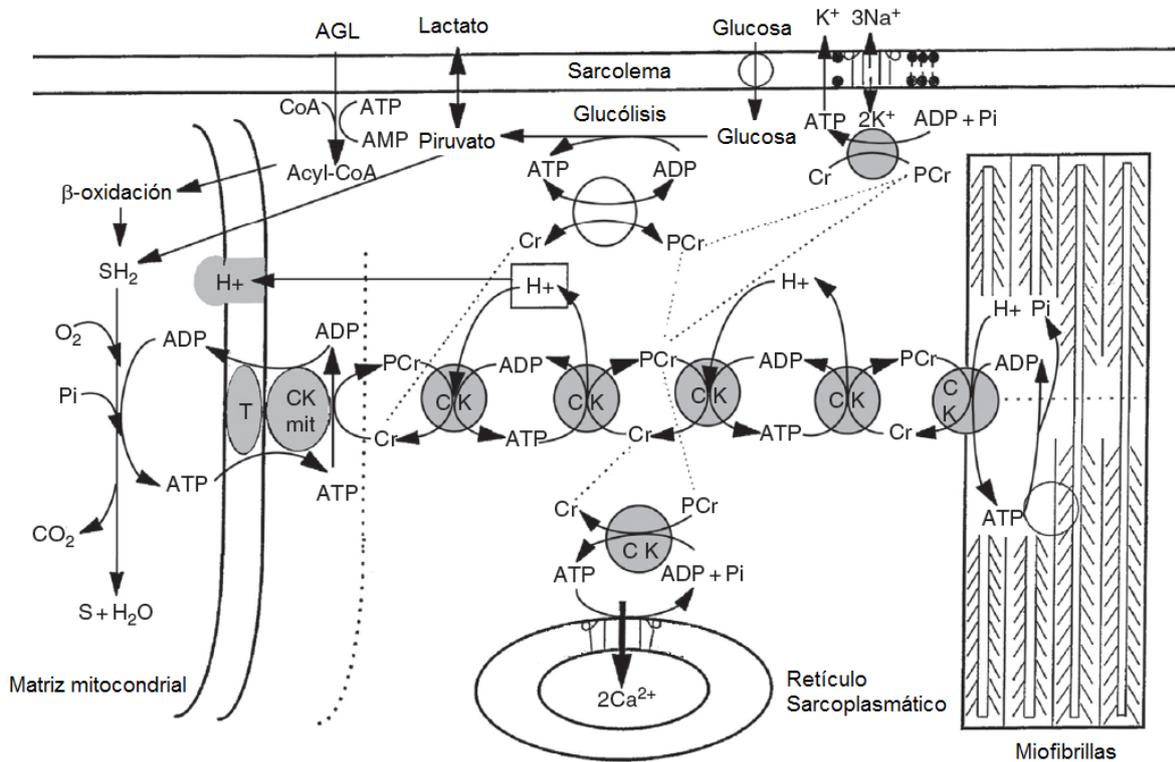
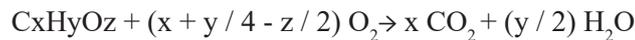


Figura 1. Vías oxidativas con producción de energía, utilizando oxígeno y generando anhídrido carbónico. AGL: ácidos grasos libres, CK: Creatinkinasa, CoA: Acetil CoA, PCr: Fosfocreatina. Modificado de Leverve, 2011 (9).

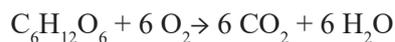
Si bien los carbonos de glucosa participan en la formación de CO₂, ellos contribuyen de modo diferente. Los carbonos C-3 y C-4, que formarán el C-1 del piruvato, contribuyen en un 100% a través de la reacción de la PDH. Los carbonos C-2 y C-5 (que forman C-2 de piruvato) y C-1 y C-6 (que forman C-3 de piruvato) formarán C-1 y C-2 del acetil-CoA y contribuirán en un 80 y 50% respectivamente en la formación de CO₂¹¹. Los ácidos grasos, glicerol, carbohidratos y muchos productos de desaminación contienen los elementos carbono, hidrógeno y oxígeno, siendo la ecuación general de oxidación:



La producción energética total a partir de la oxidación de una mol de glucosa produce 36 o 38 ATP según la lanzadera utilizada para transferencia de H⁺ desde el citosol a la mitocondria.



Para la glucosa la ecuación de oxidación es:



$$RER = VCO_2 / VO_2 = 6 CO_2 / 6 O_2 = 1$$

Por otro lado, podemos representar la ecuación del ácido palmítico como:



En el caso del ácido palmítico la ecuación de oxidación es:



$$\text{RER} = \text{VCO}_2 / \text{VO}_2 = 16 \text{ CO}_2 / 23 \text{ O}_2 = 0,7$$

Recordemos que como se necesita ATP para activar el ácido palmítico libre su rendimiento neto es de 129 moléculas de ATP¹².

En los tejidos la presión parcial de CO₂ (PCO₂) es de 47 mmHg, en sangre venosa es de 45 mmHg y en la sangre arterial es de 40 mmHg. El CO₂ difunde por el citoplasma celular y el espacio intersticial hacia el plasma. Solo del 5 al 10% se transporta disuelto, unos 0.3 ml/dL. La cantidad de CO₂ disuelto en la sangre a 45 mmHg es de 2,7 ml/dL y cae a 2,4 ml/dL a 40 mmHg. Del 5 al 10% es transportado en forma de carbaminohemoglobina, al combinarse, sin mediación enzimática, con los grupos aminoterminales de la hemoglobina. Por último, el resto, entre el 80 y el 90%, se transporta como ácido carbónico disociado¹². Una pequeña proporción del CO₂ se combina con el agua, en forma espontánea, aunque lenta, formando ácido carbónico, que se disocia en ión hidrogeno y bicarbonato. En el eritrocito la enzima anhidrasa carbónica cataliza la reacción en ambos sentidos: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_3\text{H}_2 \rightarrow \text{CO}_3\text{H}^- + \text{H}^{+13}$ siendo la cantidad CO₃H₂ formada proporcional a la PCO₂. La eliminación de CO₂ se hace luego a través de la ventilación pulmonar.

RER en el ejercicio

El RER en reposo ha sido reportada con valores de 0,927 a 0,718, siendo entonces la tasa relativa de oxidación de grasas del 23 al 93%¹⁴. Como se ve, existe una gran variabilidad del RER en reposo para los atletas entrenados, y es similar a los sujetos desentrenados. Se ha asociado esto al diferente contenido de glucógeno muscular, al volumen de entrenamiento, a la concentración de AGL, y a la ingesta de grasas. En ejercicio de intensidad, mayor al 70% de la capacidad de trabajo, la ingesta de grasas en la dieta y el volumen de entrenamiento, presentan una asociación negativa y el glucógeno muscular se asocia positivamente. Parecería ser que, independientemente de la intensidad del

ejercicio, la oxidación de sustratos puede ser regulada por la disponibilidad de los mismos. Es decir que la utilización de glucógeno muscular está determinada por el contenido de glucógeno muscular al comienzo del ejercicio.

El contenido reducido de glucógeno muscular al comienzo del ejercicio resulta en un cambio hacia la oxidación lipídica con un consiguiente menor RER¹⁵. El volumen de entrenamiento es otro determinante importante de RER, tanto en reposo como durante el ejercicio. Se observan mayores tasas de oxidación de LIP (y menores tasas de oxidación de CHO) en los atletas más entrenados que en sujetos no entrenados, aún a la misma intensidad relativa^{16,17,18} siendo pasible de ser utilizado como indicador de fitness¹⁹. El RER en reposo se comporta como un determinante independiente significativo de RER a intensidades bajas y moderadas¹⁴. Si bien la media del RER en reposo no es diferente entre mujeres y hombres, en el ejercicio submáximo a bajas intensidades (30% del VO₂max) tiende a ser menor en las mujeres que en los varones, indicando una mayor contribución de la oxidación de LIP. Pero no hay diferencia significativa entre sexos a intensidades mayores al 50%²⁰.

Durante el ejercicio intenso se incrementa la oxidación de CHO y la utilización de glucógeno muscular aportando gran parte de la energía necesaria lo que eleva los niveles de lactato, limitando así la lipólisis. Manipulando el entrenamiento y la ingesta dietaria, es posible modificar la capacidad de un atleta de alterar la utilización de sustrato durante el ejercicio en estado estable. Sin embargo, no se han reportado diferencias significativas en el RER con el uso de suplementación de CHO asociadas a PRO en trabajos contra resistencia. Aunque si se ha encontrado un cambio hacia una mayor oxidación de lípidos durante la recuperación del ejercicio en comparación con el pre-ejercicio lo que

sugiere una mayor dependencia de la oxidación de lípidos durante la recuperación²¹. Los atletas entrenados oxidan cantidades mayores de LIP solo a intensidades por debajo del 40% VO₂ pico. Pero como la mayoría de los atletas competitivos entrenan y compiten a intensidades mayores al 40%, no oxidarán cantidades mayores de LIP durante el ejercicio intenso independientemente de su condición nutricional²².

El aumento del RER de trabajo (Δ RER) por encima de un RER metabólico supuesto de 0,75 (o 0,83) muestra un aumento aproximadamente logarítmico a medida que aumenta la carga de trabajo. Existiendo una correlación en línea recta entre el exceso de CO₂ no metabólico (= CO₂ total menos 0,75 x O₂) y el aumento del lactato en sangre. El volumen minuto respiratorio en relación al VO₂ o al VCO₂ muestra una hiperventilación relativa a medida que el sujeto se acerca al esfuerzo máximo, y el exceso de CO₂ aumenta con la ventilación en línea recta. El Δ RER representa la participación porcentual de la glucólisis en el gasto total de energía en lugar del combustible utilizado durante el ejercicio²³. Entonces las tasas de oxidación de CHO y LIP pueden ser calculadas por los valores de VO₂ y VCO₂ (l/min) utilizando las siguientes formulas¹⁴:

$$\text{CHO (g/min)} = 4,55 \text{ VCO}_2 - 3,21 \text{ VO}_2$$

$$\text{LIP (g/min)} = 1,67 \text{ VO}_2 - 1,67 \text{ VCO}_2$$

Durante el ejercicio estable el RER a cualquier intensidad tiende a disminuir con la duración de la actividad²⁰. Luego, en el post esfuerzo el aumento de RER se explica por el hecho de que después de finalizar el ejercicio, los valores de VO₂ están disminuyendo bruscamente mientras que el CO₂ se mantiene igual o incluso aumenta debido a la amortiguación de CO₂. Esta situación se mantiene hasta que se elimine la mayor parte del CO₂ post-ejercicio y la homeostasis normal este restaurada. Cuanto mayor sea el volumen de CO₂ post-ejercicio que deba ser eliminado, mayor será el tiempo de retraso entre la finalización del ejercicio y el valor máximo de RER²⁴. La intensidad del ejercicio es el factor determinante para la utilización del sustrato energético durante y después del ejercicio. Inmediatamente después de un trabajo de alta intensidad como en el HIIT, el RER es mayor comparándolo a trabajos de endurance, lo que indica una mayor utilización de CHO durante e inmediatamente después del ejercicio. Pero luego, en los 25 minutos posteriores, el RER es más bajo, lo que demuestra una mayor utilización de LIP, situación que se mantiene hasta 60 minutos después. El CHO es el combustible principal utilizado en el ejercicio de intensidad moderada a alta, pero al finalizar, se cambia de CHO hacia las fuentes de energía lipídicas, reduciendo el RER^{25,26}.

RER como marcador fisiológico

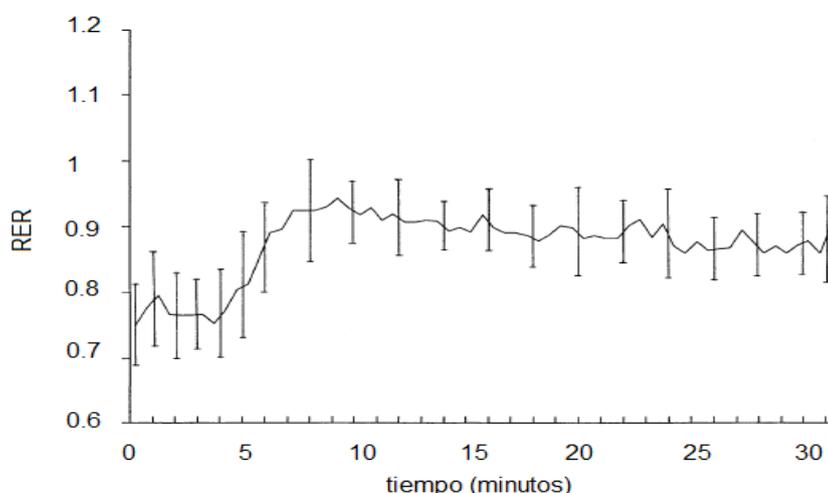


Figura 2. RER en un test de esfuerzo moderado en sujetos saludables no entrenados. 30 minutos de ejercitación mostrando el predominio de uso de CHO. Modificado de Toda y col., 2002²⁷.

Como el RER indica la capacidad oxidativa muscular y se asocia con el incremento de la intensidad del ejercicio mostrando aumento en el metabolismo de CHO y disminución de los LIP, su curva ha sido asociada a la detección de umbrales. En la Figura 2 se puede observar la magnitud de la intensidad del ejercicio, mostrando en este caso el predominio de utilización de CHO. Los valores superiores a 1,0 indican la acción buffer sobre los H^+ y, en consecuencia, hiperventilación debido al incremento en la producción de CO_2 ,

correspondiente a VT_2 . Así es que el RER 1,0 puede usarse como un método alternativo individual para detectar el VT_2 . Estos datos son comparables a la determinación computarizada del umbral y a las determinaciones por las concentraciones de lactato en sangre, con la ventaja de que es un método no invasivo y además es simple de realizar en un laboratorio²⁸. Sin embargo, algunos autores sostienen que este uso debe estar limitado a atletas de alto rendimiento²⁹.

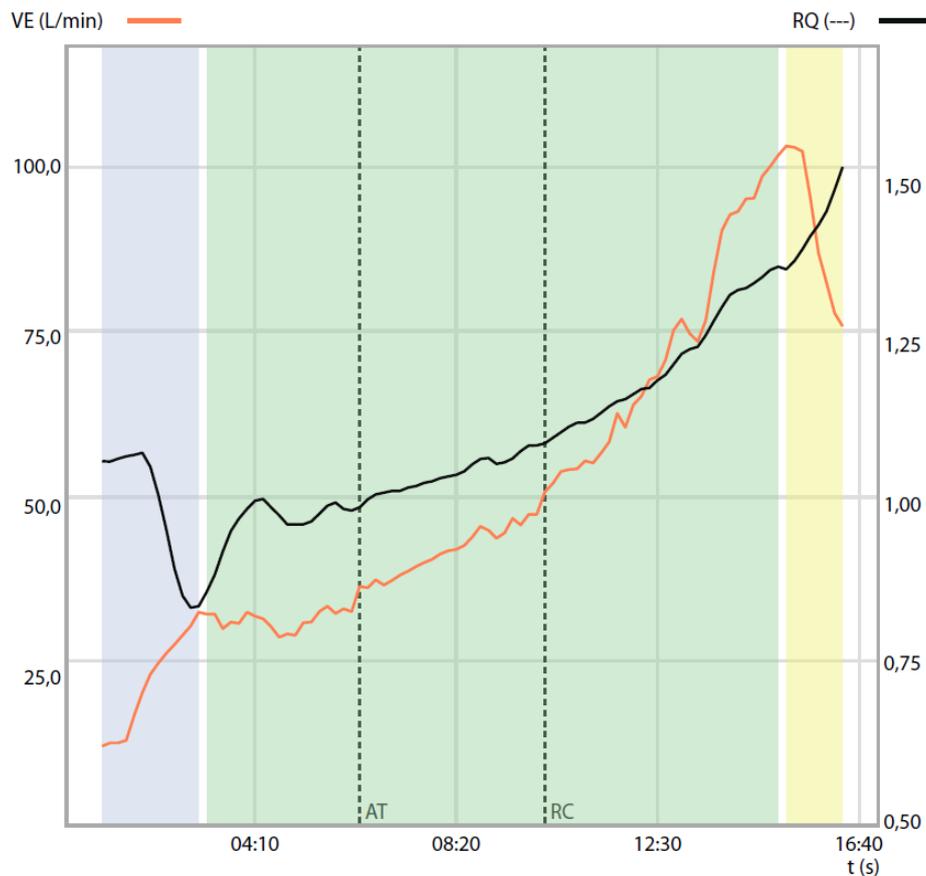


Figura 3. Grafico de VE (L/min) en relación al RQ y tiempo (s): Hockey. En este sujeto rápidamente se logra un RER 1,00 y es notable su incremento posterior.

El RER se ha propuesto como criterio de finalización en pruebas de VO_2 max, cuando no se llega a una meseta en la prueba, a pesar de que aún se busca un consenso sobre cual valor elegir. Al realizar tests submáximos el RER 0,9 – 1,0 ha reportado ser de utilidad en la determinación del pasaje de esfuerzos medianos a intensos en los tests progresivos³⁰. Pero si se utilizara un RER de 1,0 se subestimaría el VO_2 al agotamiento en

muchos atletas³¹. Por ejemplo, en la Figura 3 el sujeto testado, jugador de hockey sobre césped, rápidamente llega a un valor de RER 1, y luego lo supera ampliamente. Por otro lado, en la Figura 4, se evalúa un runner, y en este caso el registro muestra un uso predominante de LIP como sustrato y un lento incremento luego del RER 1.

Finalmente, en la Figura 4 se muestra la prueba realizada a un futbolista que llega a RER 1 con gran esfuerzo. Se había comentado antes que el ΔRER ($RER - 0,75$) aumenta logarítmicamente con la carga de trabajo y la absorción máxima de O_2 se alcanza a un valor ΔRQ de $0,40$ ³². Pero, por otro lado, si se utilizan valores como 1,05 o 1,1 o incluso 1,15, es posible que muchos evaluados no puedan alcanzar ese RER. Se debe incluso tener en cuenta la edad, ya que después de los 50 años comienza un cambio metabólico hacia un fenotipo oxidativo preferencial. Por lo tanto,

el RER debería ajustarse por edad cuando se usa como criterio para establecer el VO_{2max} ³³. De todos modos, se sugiere que en individuos sanos es suficiente lograr un $RER > 1$ como indicador de esfuerzo ya que no se observan diferencias en el VO_{2peak} entre aquellos con RER de $1,0 - 1,1$ y aquellos $\geq 1,1$, lo que sugiere que sumado a una buena percepción del esfuerzo por parte del paciente y una buena respuesta cronotrópica, un $RER > 1$ es suficiente para considerar la prueba de esfuerzo cardio respiratoria como adecuada³⁴.

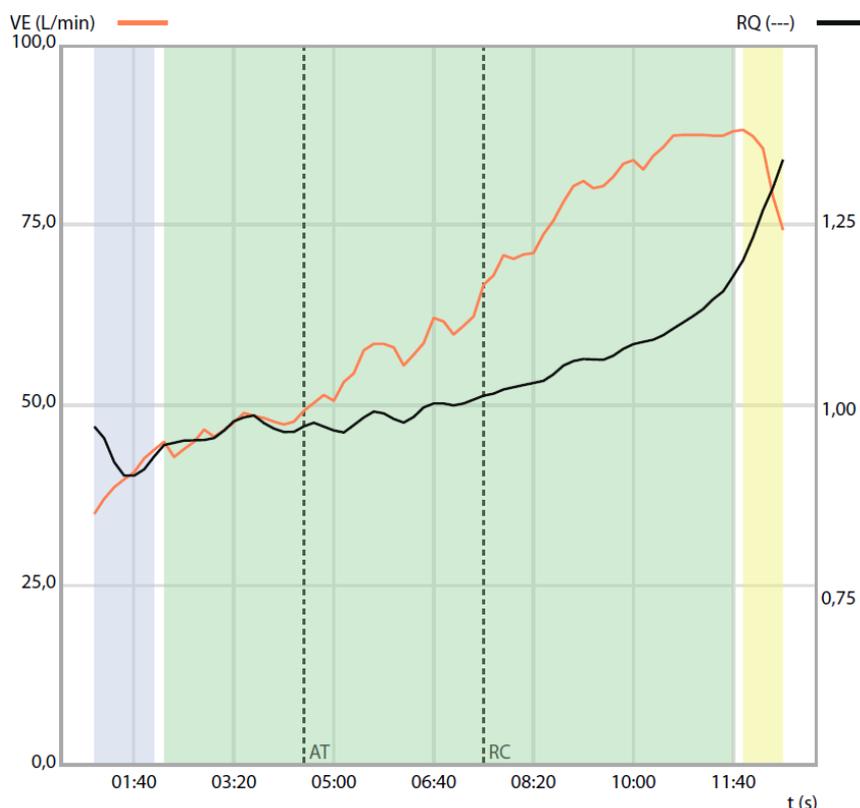


Figura 4. Grafico de VE (L/min) en relación al RQ y tiempo (s): Running. Se observa el predominio de uso de LIP como sustrato y un lento incremento luego del RER 1,00.

El RER también puede ser un testigo del nivel de fitness de un atleta. Desde hace muchos años se conoce que en atletas el entrenamiento produce mejoras en el VO_{2max} y la capacidad de endurance. Sin embargo, las mejoras en el primero son modestas en comparación con las mejoras potenciales del segundo. Esto tiene que ver con adaptaciones periféricas que resultan en un aumento de la capacidad oxidativa del músculo esquelético lo que está asociado con un cambio

hacia el metabolismo de los LIP, economizando CHO. Esto produce un ahorro de glucógeno que se refleja en un menor RER durante y después del ejercicio³⁵. Tanto así que es posible predecir el VO_{2max} , basada en la medición de RER durante una prueba de esfuerzo submáxima. Para cada trabajo entre 0,95 y 1,15 se puede calcular un factor, junto a una ecuación simple, para aproximarse a un valor con un error menor al 10%³².

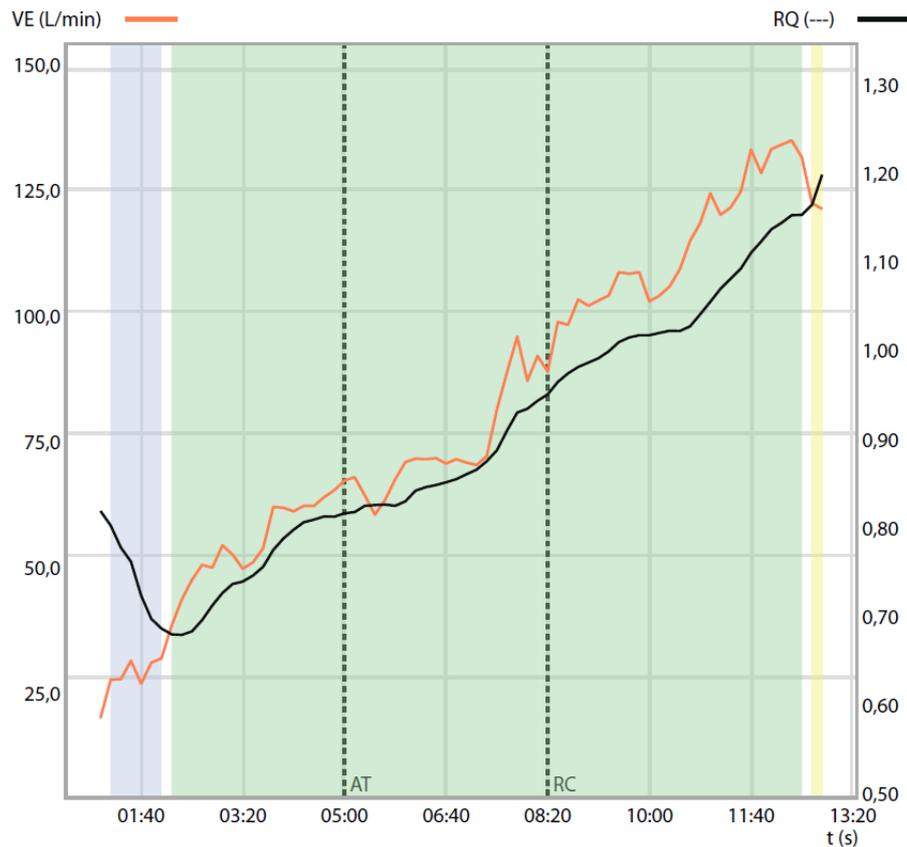


Figura 5. Gráficos de VE (L/min) en relación al RQ y tiempo (s): Fútbol. Este es un sujeto con un metabolismo basado en LIP que en el esfuerzo llega a RER 1,00.

El ámbito clínico

Se ha realizado una somera interpretación de las características principales del RER en el ámbito de la Fisiología del Ejercicio, pero en situaciones clínicas, el RER debe ser interpretado en relación a su contexto. Por ejemplo, en los pacientes con insuficiencia cardíaca que realizan un ejercicio submáximo, un RER elevado es un predictor independiente de eventos adversos como muerte por todas las causas y reingreso hospitalario por empeoramiento de la insuficiencia cardíaca. El aumento de RER en esta carga de trabajo puede atribuirse a una sobreproducción de CO_2 . Un RER alto durante el ejercicio submáximo también puede ser un marcador importante para acidosis muscular y ser utilizado como predictor de riesgo. El RER en reposo, por el contrario, no ha sido asociado con eventos adversos³⁶.

Los sujetos obesos con intolerancia a la glucosa poseen un RER en reposo similar a controles obesos sin intolerancia a la glucosa. Pero durante el ejercicio submáximo alcanzan un

RER más bajo y menor transición a la oxidación de carbohidratos. Es decir que presentan una rigidez metabólica durante el ejercicio, lo que está asociado con el grado de intolerancia a la glucosa, y es independiente de la edad y de la composición corporal³⁷.

Estándares por edad

Con el objetivo de proporcionar estándares de referencia actualizados para la aptitud cardiorrespiratoria para los Estados Unidos se procesaron los datos de 22.379 pruebas de esfuerzo (16.278 en cinta y 6.101 en cicloergómetro) realizados a sujetos de ambos sexos de 20 a 89 años sin enfermedad cardiovascular previa conocida³⁸. Se determinaron percentiles de consumo máximo de oxígeno tanto para hombres como para mujeres en los dos aparatos. El esfuerzo máximo fue definido como un RER mayor o igual a 1,0 o RER mayor o igual a 1,1, con diferencias no significativas entre ellos. También se obtuvieron los RER peak para cada sexo y grupo etario. Se puede observar como la aptitud cardiorrespiratoria

disminuye con la edad, siendo más altos en los hombres en todos los grupos de edad y más altos para la cinta que con el cicloergómetro. Ver tabla 1.

Tabla 1. Prueba de esfuerzo máximo en cinta rodante y cicloergómetro utilizando un criterio de inclusión de RER 1.0 (percentilo 50). Modificado de Kaminsky y colaboradores, 2022³⁸

	Grupos por edad, años							Todos
	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	
CintaV	n= 1278	n= 1473	n= 2119	n= 2082	n= 1663	n= 776	n= 173	n= 9564
VO _{2peak} *	45.2±11.8	40.0±11.8	35.8±10.8	30.2±9.7	25.4±8.3	21.2±6.5	17.9±3.9	33.2±12.6
RER _{peak}	1.19±0.11	1.19±0.1	1.18±0.1	1.18±0.1	1.17±0.1	1.15±0.09	1.13±0.08	1.18±0.1
CintaM	n= 1142	n= 1043	n= 1372	n= 1457	n= 1045	n= 549	n= 106	n= 6714
VO _{2peak}	36.3±10.2	29.5±9.0	26.6±8.1	23.8±6.6	20.0±5.5	17.5±4.2	15.9±4.8	26.2±9.7
RER _{peak}	1.16±0.1	1.18±0.1	1.17±0.1	1.17±0.1	1.14±0.09	1.13±0.09	1.12±0.08	1.16±0.1
BikeV	n= 367	n= 251	n= 446	n=601	n= 465	n= 257	n= 52	n= 2439
VO _{2peak}	45.1±3.3	32.4±2.8	28.9±9.	26.2±8.8	22.7±7.3	18.9±6.4	13.8±5.1	28.5±12.5
RER _{peak}	1.20±0.1	1.17±0.08	1.16±0.08	1.16±0.08	1.16±0.07	1.16±0.09	1.13±0.11	1.17±0.09
Bike M	n= 411	n= 377	n= 674	n= 1115	n= 750	n= 308	n= 27	n= 3662
VO _{2peak}	32.0±10.6	23.0±8.5	20.0±6.0	17.6±4.5	16.1±3.6	14.4±3.0	11.7±4.2	19.6±7.8
RER _{peak}	1.18±0.1	1.16±0.09	1.15±0.08	1.15±0.07	1.15±0.08	1.15±0.07	1.11±0.09	1.15±0.08

Cinta: cinta ergométrica, V: varón, M: Mujer, * mLO₂.kg⁻¹.min⁻¹, Bike: Cicloergómetro

Conclusiones

El RER es una variable que brindan las pruebas con analizadores de gases realizadas de modo no invasivo que incluso pueden ser realizadas en campo o pista con los equipos actuales. Su correcta interpretación permite aportes a la interpretación de las evaluaciones, considerando los sustratos utilizados, la intensidad alcanzada e incluso valorando el nivel de aptitud del atleta. Conocerlo e interpretarlo nos permite optimizar la valoración fisiológica del atleta.

En una prueba de esfuerzo graduada, un aumento en el RER de 0,8 a 1,0 refleja el aumento del predominio del metabolismo glucolítico sobre el oxidativo. En individuos sanos una adecuada percepción del esfuerzo, una buena respuesta cronotrópica y un RER > 1 es suficiente para considerar la prueba de esfuerzo cardiorrespiratoria como adecuada. Los valores superiores a 1,0 indican la acción buffer sobre los H⁺ y, en consecuencia, hiperventilación debido al incremento en la producción de CO₂, correspondiente a VT2. Así es que el RER 1,0 puede usarse como un método alternativo individual para detectar el VT2.

Bibliografía

1. Patel H, Kerndt CC, Bhardwaj A. Physiology, Respiratory Quotient. StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021. Accesible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK531494/?report=printable>
2. Albouaini K, Egred M, Alahmar A, Wright DJ. Cardiopulmonary exercise testing and its application. *Postgrad Med J*. 2007;83(985):675-82. <https://doi.org/10.1136/hrt.2007.121558>
3. Widmaier EP, Raff H, Strang KT. *Vander's Human Physiology: The mechanisms of body function*. 14aed. New York: McGraw Hill; 2016. ISBN 9781259294099.
4. Montoye HJ. Energy costs of exercise and sport. En Maughan RJ. *Nutrition in sport*. Volume VII of the Encyclopaedia of Sports Medicine. London: Blackwell Science; 2000. p53-72.
5. Frederiksen P M. Exercise testing. En Moller JH, Hoffman JIE (editors). *Pediatric Cardiovascular Medicine*. 2a ed. Chichester, West Sussex, UK: Wiley-Blackwell; 2012.
6. Krogh A, Lindhard J. The relative value of fat and carbohydrate as sources of muscular energy with appendices on the correlation between standard metabolism and the respiratory quotient during rest and work. *The Biochemical journal*. 1920, 14(3-4), 290–363. <https://doi.org/10.1042/bj0140290>
7. Kiens B, Hawley JA. Fat metabolism. En Lanham-New SA, Stear SJ, Shirreffs SM, Collins AL (editors). *Sport and exercise nutrition*. Chichester, West Sussex, UK: Wiley-Blackwell; 2011.
8. Kinnear W, Blakey J. A practical guide to the interpretation of cardio-pulmonary exercise tests. *Oxford Respiratory Medicine Library* (Oxford, 2014; online edn, Oxford Academic, 1 July 2014). <https://doi.org/10.1093/med/9780198702467.001.0001>
9. Lerverve XM. Integration of metabolism 1: energy. En Lanham-New SA, Macdonald IA, Roche HM (editors). *Nutrition and metabolism*. 2a ed. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley-Blackwell; 2011. ISBN: 978-1-405-16808-3
10. Brooks GA, Dubouchaud H, Brown M, Sicurello JP, Butz CE. Role of mitochondrial lactate dehydrogenase and lactate oxidation in the intracellular lactate shuttle. *Proc.Natl. Acad. Sci. USA*. 1999; 96: 1129–34.
11. Glamour TS, McCullough AJ, Sauer PJ, Kalhan SC. Quantification of carbohydrate oxidation by respiratory gas exchange and isotopic tracers. *Am J Physiol*. 1995 Apr;268(4 Pt 1):E789-96.
12. Blanco A, Blanco G. *Química biológica*. 10ª ed. Buenos Aires: El Ateneo; 2016.
13. Albaladejo Ortiz C, López AM, Albaladejo Méndez J. Bicarbonato y dióxido de carbono. Fundación para la formación en investigación sanitaria de la región de Murcia (sitio web). Cartagena; 2012. Accesible en: http://www.ffis.es/volviendoalobasico/tema_12_bicarbonato_y_dixido_de_carbono.html
14. Goedecke JH, St Clair Gibson A, Grobler L, Collins M, Noakes TD, Lambert EV. Determinants of the variability in respiratory exchange ratio at rest and during exercise in trained athletes. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2000; 279: E1325–E34.

15. Weltan SM, Bosch AN, Dennis SC, Noakes TD. Influence of muscle glycogen content on metabolic regulation. *Am. J. Physiol.* 1998; 274 (Endocrinol. Metab. 3937): 72–82.
16. Coggan AR, Raguso CA, Gastaldelli A, Sidossis LS, Yeckel CW. Fat metabolism during high-intensity exercise in endurance-trained and untrained men. *Metabolism.* 2000; 49: 122-8.
17. Bergman BC, Brooks GA. Respiratory gas-exchange ratios during graded exercise in fed and fasted trained and untrained men. *J. Appl. Physiol.* 1999; 86(2): 479–87.
18. Jeukendrup AE, Mensink M, Saris WHM, Wagenmakers AJM. Jeukendrup Exogenous glucose oxidation during exercise in endurance-trained and untrained subjects. *J. Appl. Physiol.* 1997; 82(3): 835–40.
19. Ramos-Jiménez A, Hernández-Torres RP, Torres-Durán PV, Romero-Gonzalez J, Mascher D, Posadas-Romero C, Juárez-Oropeza MA. The Respiratory Exchange Ratio is associated with fitness indicators both in trained and untrained men: a possible application for people with reduced exercise tolerance. *Clinical Medicine: Circulatory, Respiratory and Pulmonary.* 2008; 2: 1–9. <https://doi.org/10.4137/ccrpm.s449>
20. Pillard F, Moro C, Harant I, Garrigue E, Lafontan M, Berlan M, et al. Lipid oxidation according to intensity and exercise duration in overweight men and women. *Obesity (Silver Spring, Md.).* 2007, 15(9), 2256–62. <https://doi.org/10.1038/oby.2007.268>
21. Laurenson DM, Dubé DJ. Effects of carbohydrate and protein supplementation during resistance exercise on respiratory exchange ratio, blood glucose, and performance. *Journal of Clinical & Translational Endocrinology.* 2015; 2(1):1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jcte.2014.10.005>
22. Bergman B C, Butterfield GE, Wolfel EE, Casazza GA, Lopaschuk GD, Brooks GA. Evaluation of exercise and training on muscle lipid metabolism. *The American journal of physiology.* 1999, 276(1): E106–E117. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1999.276.1.E106>
23. Issekutz B, Rodahl K. Respiratory quotient during exercise. *Journal of Applied Physiology.* 1961; 16(4): 606-10. <https://doi.org/10.1152/jappl.1961.16.4.606>
24. Gribok A, Rumpel W, DiPietro L. Kinetics of post-exercise excess CO₂ production and substrate oxidation in two dysglycemic and euglycemic older women a case study. *Diabetes Case Rep.* 2016;1:2. <https://doi.org/10.4172/2572-5629.1000107>
25. Wingfield HL, Smith-Ryan AE, Melvin MN, Roelofs EJ, Trexler ET, Hackney AC, et al. The acute effect of exercise modality and nutrition manipulations on post-exercise resting energy expenditure and respiratory exchange ratio in women: a randomized trial. *Sports Medicine – open.* 2015; 2:11. <https://doi.org/10.1186/s40798-015-0010-3>
26. Kuo C, Fattor JA, Henderson GC, Brooks GA. Lipid oxidation in fit young adults during postexercise recovery. *Journal of applied physiology,* 2005, (Bethesda, Md. : 1985), 99(1), 349–356. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00997.2004>
27. Toda K, Oshida Y, Tokudome M, Manzai T, Sato Y. Effects of moderate exercise on metabolic responses and respiratory Exchange ratio (RER). *Nagoya J Med Sci.* 2002;65:109-13.
28. Solberg G, Robstad B, Skjønsberg OH, Borchsenius F. Respiratory gas exchange indices for estimating the anaerobic threshold. *Journal of Sports Science and Medicine.* 2005; 4: 29-36.

29. Diefenthaler F, Sakugawa RL, Dellagrana RA, Follmer B, Lemos EC, de Campos W. Is respiratory exchange ratio an alternative to estimate anaerobic threshold in trained runners? *Rev Bras CineantropomDesempenho Hum*. 2017;19(1):108-17. <http://dx.doi.org/10.5007/1980-0037.2017v19n1p108>
30. Williamson W, Fuld J, Westgate K, Sylvester K, Ekelund U, Brage S. Validity of reporting oxygen uptake efficiency slope from submaximal exercise using respiratory exchange ratio as secondary criterion. *Pulmonary medicine*. 2012; 2012, Article ID 874020, <https://doi.org/10.1155/2012/874020>
31. Barker AR, Williams CA, Jones AM, Armstrong N. Establishing maximal oxygen uptake in young people during a ramp cycle test to exhaustion. *Br J Sports Med*. 2011;45:498–503. <https://doi.org/10.1136/bjism.2009.063180>
32. Issekutz B, Birkhead NC, Rodahl K. The use of respiratory quotients in assessment of aerobic work capacity. *J Appl Physiol*. 1962;17: 47–50.
33. Edvardsen E, Hem E, Anderssen SA. End criteria for reaching maximal oxygen uptake must be strict and adjusted to sex and age: a cross-sectional study. *PLOS one*. January 2014, 9(1): e85276. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085276>
34. Genberg M, Andren B, Lind L, Hedenstrom H, Malinovsky A. Commonly used reference values underestimate oxygen uptake in healthy, 50-year-old Swedish women. *Clinical physiology and functional imaging*. 2018, 38(1), 25–33. <https://doi.org/10.1111/cpf.12377>
35. Hardman AE, Williams C. Exercise metabolism in runners. *British journal of sports medicine*, 1983, 17(2), 96–101. <https://doi.org/10.1136/bjism.17.2.96>
36. Kakutani N, Fukushima A, Yokota T, Katayama T, Nambu H, Shirakawa R, et al. Impact of high respiratory exchange ratio during submaximal exercise on adverse clinical outcome in heart failure. *Circulation journal: official journal of the Japanese Circulation Society*. 2018, 82(11): 2753–60. <https://doi.org/10.1253/circj.CJ-18-0103>
37. Prior SJ, Ryan AS, Stevenson TG, Goldberg AP. Metabolic inflexibility during submaximal aerobic exercise is associated with glucose intolerance in obese older adults. *Obesity*. 2014; 22: 451-7. <https://doi.org/10.1002/oby.20609>
38. Kaminsky LA, Arena R, Myers J, Peterman JE, Bonikowske AR, Harber MP, et al. Updated reference standards for cardiorespiratory fitness measured with cardiopulmonary exercise testing: data from the Fitness Registry and the Importance of Exercise National Database (FRIEND). *Mayo Clinic Proceedings*. 2022;97(2):285-93. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2021.08.020>

Conflicto de Intereses: No se reporta ninguno por los autores

Fuente de financiamiento: Recursos propios