

INVESTIGACIÓN ORIGINAL

# CONCEPTOS FISIOLÓGICOS IMPLICADOS EN LA COMPRESIÓN DE LAS PRUEBAS DE FUNCIÓN PULMONAR

## PHYSIOLOGICAL CONCEPTS INVOLVED IN PULMONARY FUNCTION TESTS

Monge Rodríguez, Silvia Leticia<sup>1,2</sup>; Murillo Rojas, Fernando<sup>1,3</sup> y Suárez Urhan, Adriana<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Fisiología, Escuela de Medicina, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

<sup>2</sup>ORCID ID: [orcid.org/0000-0002-7857-4667](https://orcid.org/0000-0002-7857-4667). [silvia.monge.ro@gmail.com](mailto:silvia.monge.ro@gmail.com)

<sup>3</sup>ORCID ID: [orcid.org/0000-0002-2888-7083](https://orcid.org/0000-0002-2888-7083). [fredmr06@gmail.com](mailto:fredmr06@gmail.com)

<sup>4</sup>ORCID ID: [orcid.org/0000-0002-5748-3803](https://orcid.org/0000-0002-5748-3803). [adriana.suarez@ucr.ac.cr](mailto:adriana.suarez@ucr.ac.cr)

**Resumen:** Las pruebas de función pulmonar evalúan los volúmenes y capacidades pulmonares, la resistencia de la vía aérea y la respuesta del sistema respiratorio al ejercicio. El objetivo de este artículo es abordar fisiológicamente la realización e interpretación de las pruebas dinámicas, la curva flujo-volumen y la caminata de los 6 minutos. Tanto en las pruebas dinámicas como en la curva flujo – volumen se refleja la resistencia de la vía aérea, aquellos factores que influyen en la resistencia afectarán los resultados de estas pruebas. El ejercicio produce un aumento del flujo sanguíneo pulmonar y de la ventilación alveolar, fenómenos que normalmente no deberían producir alteración de la conducción y difusión del O<sub>2</sub> a los tejidos y del CO<sub>2</sub> hacia el aire alveolar. La caminata de los 6 minutos no permite identificar las causas de la limitación al ejercicio, pero permite la valoración global de la tolerancia al ejercicio de una persona.

**Palabras clave:** pruebas de función pulmonar, flujo espiratorio, capacidad vital forzada, resistencia de la vía aérea, ejercicio. Fuente: MeSH.

Recibido: 4 julio 2019. Aceptado: 2 Septiembre 2019. Publicado: 28 Octubre 2019.

Revista electrónica publicada por el Departamento de Farmacología de la Escuela de Medicina de la Universidad de Costa Rica, 2060 San José, Costa Rica. © All rights reserved. Licensed under a Creative Commons Unported License.



Contáctenos: [rev.med.ucr@gmail.com](mailto:rev.med.ucr@gmail.com). Tel: (506) 25-11 4492, Fax: 25-11-4489.

**Abstract:** Pulmonary function tests evaluate lung volumes and capacities, airway resistance, and the response of the respiratory system to exercise. The objective of this article is to approach physiologically the performance and interpretation of: dynamic test, flow-volume curve and 6-minute walk test. The dynamic test and the flow - volume curve reflect the resistance of the airway, factors that influence resistance will affect the results of these tests. Exercise produces an increase in pulmonary blood flow and alveolar ventilation, events that normally do not produce disturbances in conduction and diffusion of O<sub>2</sub> to tissues and CO<sub>2</sub> into alveolar air. The 6-minute walk test does not allow to identify the causes of exercise limitation, but it allows the global assessment of exercise tolerance.

**Key words:** pulmonary function tests, expiratory airflow, forced vital capacity, airway resistance, exercise. Source: MeSH.

## INTRODUCCIÓN

Las pruebas de función pulmonar se pueden utilizar para evaluar la resistencia de las vías aéreas al flujo del aire y la respuesta del sistema respiratorio durante la actividad física o el ejercicio. Además, permiten afinar diagnósticos, definir fenotipos, hacer el seguimiento de los pacientes, evaluar el impacto del tratamiento, estratificar la severidad de la enfermedad, predecir su evolución y la existencia de riesgo de muerte. Las pruebas de función pulmonar suelen clasificarse según sean dinámicas o estáticas (1).

En las pruebas estáticas se determinan los volúmenes y las capacidades pulmonares, estas traducen el volumen pulmonar que se tiene a una presión transpulmonar específica (P<sub>TP</sub>) (ver Tabla No. 1). Estos volúmenes dependen de factores como la edad, el peso, la estatura y el sexo de la persona, y se comparan con valores de referencia poblacionales (2-5). Alteraciones en estos valores predicen un patrón obstructivo o restrictivo, pero con menor sensibilidad que las pruebas dinámicas (2,6). Cuando se emplean las pruebas estáticas se puede calcular el grado de distensibilidad o *compliance* pulmonar, es decir, la razón entre el cambio de volumen pulmonar ante un determinado cambio de la P<sub>TP</sub> (2,3).

**Tabla No. 1** Distintas presiones transmurales que afectan la vía aérea, P<sub>A</sub>: presión alveolar, P<sub>IP</sub>: presión intrapleural (7,8).

**Presión transmural de un compartimento**  $P_{TM} = P_{adentro} - P_{afuera}$

**Presión transpulmonar**  $P_{TP} = P_A - P_{IP}$

**Presión trans vía respiratoria**  $P_{VR} = P_{vía\ aérea} - P_{IP}$

Por otro lado, las pruebas dinámicas miden flujos, es decir, el volumen que se desplaza por unidad de tiempo. El flujo está determinado por los factores descritos en la ley de Poiseuille (los cuales se describirán más adelante) que afectan la resistencia de la vía aérea y la interacción con la retracción elástica pulmonar y el trabajo de la caja torácica (2). Cuando aumenta la resistencia de la vía aérea se piensa en un patrón obstructivo que limita el flujo; mientras que cuando existe una ganancia de la retracción elástica pulmonar o una disminución del trabajo de la caja torácica se genera un patrón restrictivo (2,9).

El objetivo de esta revisión consiste en explicar mediante un abordaje fisiológico la realización e interpretación de las pruebas de función pulmonar

más utilizadas en los contextos clínicos, así como los conceptos de resistencia de la vía aérea, retracción elástica y los cambios respiratorios asociados con el ejercicio. Se estudiarán pruebas dinámicas pulmonares, la curva flujo volumen y la caminata de los 6 minutos.

### MÉTODO

Se realizó una búsqueda bibliográfica de artículos científicos indexados en la base de datos *Pubmed*, así como material de referencia disponible en *Clinical Key* y *Access Medicine*. Se accedió a estas bases de datos por medio del sistema de bibliotecas, documentación e información de la Universidad de Costa Rica ([sibdi.ucr.ac.cr](http://sibdi.ucr.ac.cr)), no se limitó el periodo de publicación, pero se priorizaron los artículos publicados en los últimos 5 años, las palabras clave fueron *pulmonary function tests, expiratory airflow, forced vital capacity, airway resistance*. Las imágenes fueron creadas con el programa *Above Illustrator CC*.

### FACTORES QUE DETERMINAN LA RESISTENCIA DE LAS VÍAS RESPIRATORIAS

La resistencia de las vías respiratorias se refiere al impedimento al flujo del aire en las vías aéreas, especialmente en las vías de conducción (incluye hasta los bronquiolos terminales) que es donde el flujo se da por convección y no por difusión, como sucede desde este punto hasta llegar a los alvéolos (10). Considerando la *ley de Ohm* aplicada al flujo del aire en las vías aéreas, este depende directamente del gradiente de presión entre el alvéolo y la boca o la nariz y, en forma inversa de la resistencia que generan las vías respiratorias, según la siguiente fórmula:

$$\dot{V} = \frac{P_A - P_B}{R_{VR}}$$

$\dot{V}$  es el flujo en l/s,  
 $P_A$  es la presión alveolar,  
 $P_B$  es la presión barométrica, ambas en cmH<sub>2</sub>O y  
 $R_{VR}$  es la resistencia de las vías respiratorias (cmH<sub>2</sub>O/l/s).

A nivel de la boca o nariz se tiene una presión total del aire que es igual a la presión barométrica del lugar donde se encuentra la persona (8).

Una aproximación a los factores que afectan la resistencia de las vías respiratorias se obtiene al analizar el problema basado en la ecuación de Poiseuille que considera los factores que afectan la resistencia que ofrece un tubo al flujo del aire (8):

$$R = \frac{8\eta L}{\pi r^4}$$

La resistencia (R) al flujo del aire será directamente proporcional a la viscosidad de este ( $\eta$ ) y a la longitud de las vías aéreas (L) e inversamente proporcional al radio de la vía aérea elevado a la cuarta potencia ( $r^4$ ), lo que hace que el radio de la vía aérea sea el factor más importante para determinar la resistencia al flujo. Se debe recordar que, estrictamente, la ley de Poiseuille se aplica a flujos laminares y en las vías aéreas el flujo laminar se observa a nivel de los bronquiolos terminales y porciones más distales a estos. En el resto de la vía aérea predominan los flujos turbulentos y de transición o inestables que fácilmente se tornan turbulentos, por lo que requerirán de mayores gradientes de presión para darse y, por supuesto, también serán influidos por el radio de la vía aérea.

La fórmula para calcular la resistencia de las vías respiratorias es:  $R_{VR} = \frac{P_A - P_B}{\dot{V}}$  con las

siguientes unidades: cmH<sub>2</sub>O/l/s, como ya se ha indicado. Si realizamos el cálculo considerando una  $P_A$  de +2 cmH<sub>2</sub>O con un flujo de aire de 2 l/s se tendrá una resistencia al flujo del aire de  $1 \frac{\text{cmH}_2\text{O}}{\text{l/s}}$

durante una espiración en eupnea. La resistencia normal de las vías respiratorias, en adultos, se encuentra entre 0,6 y 2,3 cmH<sub>2</sub>O/l/s (8).

Después que el morfológico suizo Ewald Weibel publicó su minucioso trabajo sobre la morfología de los pulmones incluyendo sus vías aéreas, se hizo

evidente el hecho de que las vías aéreas pequeñas (con un diámetro menor a 2 mm) son muy abundantes, que su área de sección transversal agregada es muy grande con respecto a las vías aéreas de mayor tamaño, por lo que en este sitio no residía la mayor resistencia al flujo del aire en la vía aérea, contrario a lo que se creía hasta ese momento **(11,12)**. Actualmente, es claro que la mayor resistencia al flujo del aire no se encuentra en la vía aérea pequeña, pero es en ese territorio donde se asienta gran parte de la patología que conduce a problemas obstructivos pulmonares **(10)**.

La  $R_{VR}$  afecta cuando existe flujo de aire, es decir, durante una condición dinámica pulmonar, en el cual el volumen pulmonar es cambiante, ya que el aire está entrando (inspiración) o saliendo (expiración). En dichas situaciones, la  $P_A$  y la  $P_B$  son diferentes. Durante la inspiración la  $R_{VR}$  no suele presentar problemas. Normalmente durante la inspiración la  $R_{VR}$  no suele representar un problema, al aumentar el volumen pulmonar por incremento de la  $P_{TP}$ , incrementa la  $P_{VR}$  y las vías se encuentran abiertas, lo cual ofrece poca resistencia al flujo del aire. Pero cuando existe un problema obstructivo importante de la vía respiratoria podría existir limitación del flujo aéreo durante la inspiración **(13)**. Esto representa un inconveniente en condiciones de alta frecuencia respiratoria, ya que en esta circunstancia se reduce el tiempo inspiratorio **(14)**. Cuando ocurre lo anterior, los alvéolos suplidos por la vía aérea obstruida podrían incluso ser excluidos de la ventilación pulmonar **(10)**.

El radio de las vías respiratorias depende de factores pasivos y factores activos. Por un lado, los factores pasivos son aquellos que afectan la  $P_{TM}$  de la vía respiratoria o  $P_{VR}$  (ver Tabla No 1). También son factores pasivos el aumento en el moco o el edema de la mucosa. Por otro lado, los factores activos se relacionan con el grado de contracción del músculo liso bronquial o bronquiolar **(8)**.

En relación con la  $P_{VR}$ , si es positiva, la vía respiratoria tenderá a estar abierta para ir

cerrándose al disminuir y finalmente colapsarse con  $P_{TM}$  o  $P_{VR}$  cercanas a cero o negativas. Esto, siempre que la anatomía de la vía aérea lo permita, ya que la presencia de cartílago en su pared permite radios de la vía aérea mayores a  $P_{TM}$  menores **(15)** (ver Tabla No. 1 y Figura No. 1A).

Otro principio muy importante dentro del análisis de este tema es la relación de interdependencia establecida entre las vías respiratorias y el parénquima pulmonar (alvéolos) puesto que, al abrirse los alvéolos durante la inspiración, halan la pared de las vías aéreas lo que aumenta su diámetro. De esta manera, el volumen pulmonar es un factor importante al determinar la  $R_{VR}$ . Por el contrario, a volúmenes pulmonares muy bajos, las  $P_{VR}$  serán bajas o negativas, lo que aumenta la  $R_{VR}$ . Esto sucederá más en las bases pulmonares cuando la persona está erguida ya que las  $P_{IP}$  serán mayores que en el ápex.

Otro factor es la influencia de la retracción elástica pulmonar sobre la apertura de las vías respiratorias. El retroceso elástico pulmonar influye sobre la  $P_{IP}$  ya que al ser una fuerza que siempre tiende a que el pulmón se desinfe, aumenta el volumen del espacio intrapleural y por consiguiente disminuye su presión (se hace más negativa), o que provoca un aumento de la  $P_{VR}$ . En el caso en que disminuya el retroceso elástico pulmonar, la  $P_{IP}$  tenderá a ser menos negativa de lo normal y, por consiguiente, la  $P_{VR}$  será menor y la  $R_{VR}$  aumentará (ver Figura No. 1B). Esto es lo que sucede en el enfisema pulmonar, lo cual contribuye a la obstrucción de la vía respiratoria.

Es importante recordar que el retroceso elástico pulmonar determina la  $P_A$  y, por consiguiente, el gradiente de presión alvéolo-boca **(12)**. Si hay poco retroceso elástico pulmonar, el gradiente de presión alvéolo-boca será pequeño, lo que también contribuye con la obstrucción de la vía respiratoria en el enfisema pulmonar **(7)**.

El músculo liso bronquial y bronquiolar responde a muchos estímulos que provocan su contracción, disminuyendo el radio de la vía aérea y

aumentando la resistencia al flujo del aire: la acetilcolina, la histamina, los leucotrienos, tromboxano A<sub>2</sub>, serotonina, los agonistas alfa adrenérgicos y la endotelina (16). Una disminución de la presión parcial de CO<sub>2</sub> en la vía aérea también genera la contracción del músculo liso bronquiolar (7). Esto podría tener importancia como un mecanismo local de compensación ante la aparición del espacio muerto alveolar (8). En cambio el estímulo simpático (receptores beta 2) y el óxido nítrico relajan el músculo liso bronquial. Un aumento en la presión parcial de CO<sub>2</sub> o una disminución de la presión parcial de O<sub>2</sub> en la vía aérea provocan bronco-relajación (7).

### PRUEBAS QUE EVALÚAN LA RESISTENCIA DE LA VÍA RESPIRATORIA

Una medición directa de la R<sub>VR</sub> al flujo del aire implica poder cuantificar simultáneamente el cambio en el gradiente de presión boca - alvéolo y el flujo de aire a través de la boca. Se puede realizar con un pletismógrafo (medir P<sub>A</sub>) adaptado con un pneumotacógrafo (medir flujo) (1,17). Esto puede resultar complicado y costoso por lo que frecuentemente se emplea una espirometría (18).

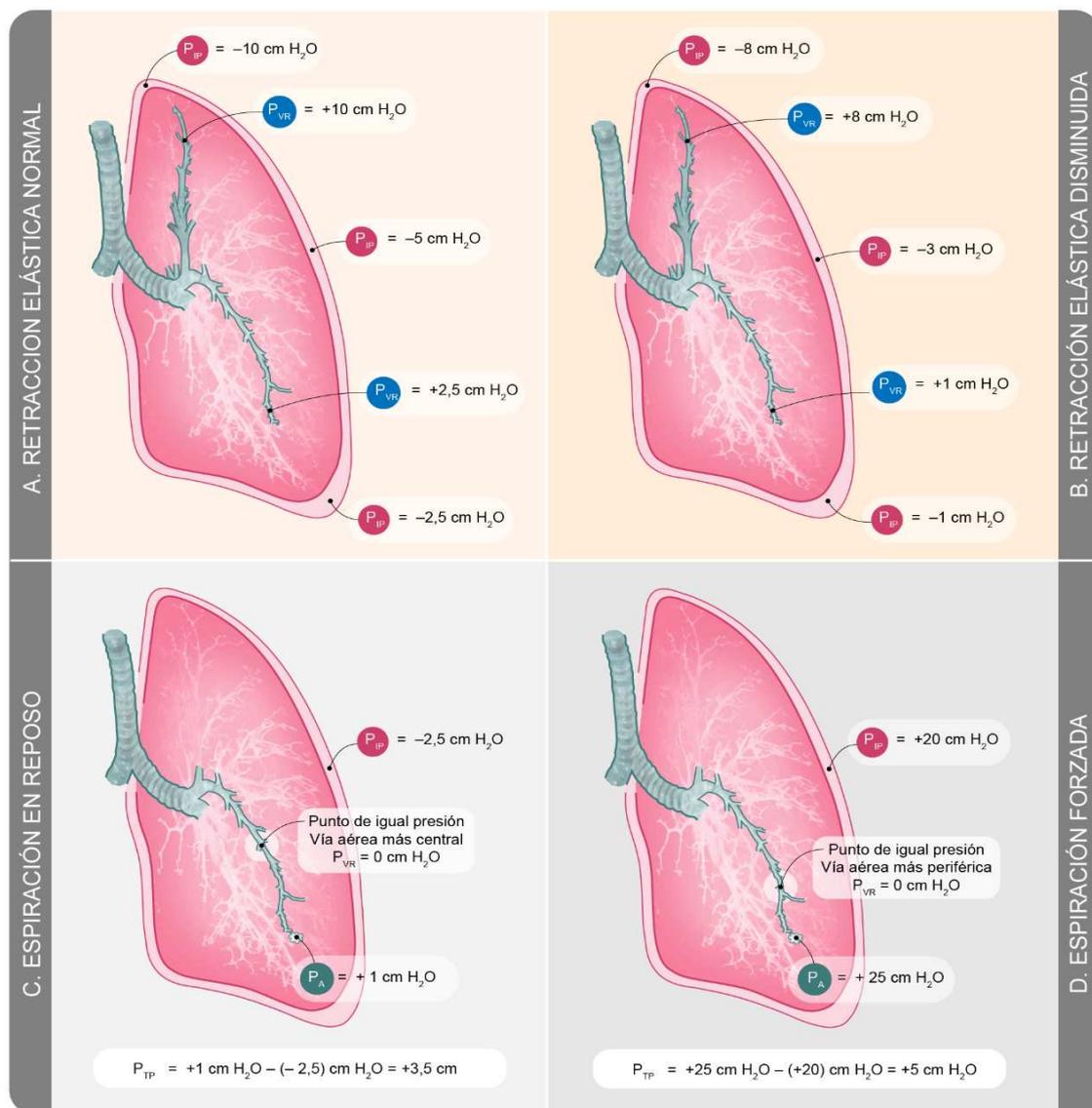
Para valorar la R<sub>VR</sub> por medio de la espirometría, se utilizan: la medición de la capacidad vital forzada (CVF), el volumen espirado forzado en el primer segundo (VEF<sub>1</sub>), y la relación entre estos dos parámetros o VEF<sub>1</sub>/CVF. La CVF se define como el volumen de aire espirado en forma máxima desde la capacidad pulmonar total, el VEF<sub>1</sub> es el volumen de aire espirado en forma máxima desde la capacidad pulmonar total durante el primer segundo de la espiración (19).

Se ha utilizado la razón VEF<sub>1</sub>/CVF para el diagnóstico de procesos patológicos que producen obstrucción de la vía aérea, observándose una disminución del VEF<sub>1</sub> en relación con la CVF (16). Para adultos jóvenes esta relación se encuentra entre 0,75-0,80. En sujetos mayores de 60 años puede ser normal entre 0,60-0,65 (19). Para valorar los resultados de estas pruebas se puede consultar la publicación de Hankinson (4) que

incluye los datos de un gran estudio realizado en la población estadounidense (entre 8 y 80 años) de ambos sexos y pertenecientes a la población caucásica, africana-americana y mexicana-americana. Este estudio fue realizado en personas sanas y no fumadoras, los datos fueron también analizados según estatura. Un valor aislado de VEF<sub>1</sub> o CVF para un paciente no tiene significado si no se ha comparado con un valor de referencia (20).

Huprikar *et al.* (21) compara la razón VEF<sub>1</sub>/CVF con VEF<sub>1</sub>/CVL (CVL: capacidad vital realizada en forma lenta). La diferencia entre la CVF y la CVL es mayor en las personas con problemas obstructivos que en las personas sin problemas obstructivos; también, la diferencia aumenta con la edad. Aparentemente, la CVL da valores mayores que la CVF cuando existe obstrucción de la vía respiratoria, lo cual podría relacionarse con el cierre dinámico de la vía aérea (ver Figura No. 1C y 1D). La utilización de la razón VEF<sub>1</sub>/CVL, aumenta el diagnóstico de problemas obstructivos en personas asintomáticas (22).

A continuación, se señalan algunos aspectos técnicos de las pruebas de función pulmonar. Los volúmenes medidos se expresan a temperatura corporal y presión ambiente saturados con vapor de agua conocido como BTPS, por sus siglas en inglés; a pesar de que son medidos a temperatura y presión ambiente saturados con vapor de agua, conocido como ATPS, por sus siglas en inglés. Dentro de los estándares que deben de cumplir las pruebas de función pulmonar, se pueden mencionar los principales: contar con un equipo sin fugas, tener un inicio sin interrupciones, no toser o detenerse durante la prueba, no terminar abruptamente, realizar un esfuerzo máximo durante toda la medición y registrar hasta obtener una línea horizontal, lo que implica un registro de por lo menos 6s (20). Este último parámetro puede ser difícil de lograr en algunos pacientes con patrones obstructivos, por lo que se recomienda realizar maniobras de 3s donde se miden parámetros que son estadísticamente similares (23). Es recomendable hacer 3 mediciones y luego



**Figura No. 1.** Retracción elástica pulmonar y cierre dinámico de la vía aérea.

La retracción elástica pulmonar se refiere a la fuerza con que el pulmón regresa a la posición de equilibrio, con una  $P_{TP}=0$  cmH<sub>2</sub>O. **A.**  $P_{VR}$  en una persona con retroceso elástico normal, al final de la espiración eupneica en posición erguida. **B.**  $P_{VR}$  en una persona con retroceso elástico disminuido (ejemplo: enfisema), al final de la espiración eupneica en posición erguida.

El cierre dinámico de la vía aérea es el fenómeno que produce el cese del flujo espiratorio en las vías aéreas. **C.** Durante una espiración en reposo, en promedio la  $P_{IP}$  puede aumentar a  $-2,5$  cmH<sub>2</sub>O y la  $P_A$  a  $+1$  cmH<sub>2</sub>O, la  $P_{TP}$  sería  $+3,5$  cmH<sub>2</sub>O. **D.** En una espiración forzada máxima, en promedio la  $P_{IP}$  puede aumentar a  $+20$  cmH<sub>2</sub>O y la  $P_A$  ser cercana a  $+25$  cmH<sub>2</sub>O, eso quiere decir que la  $P_{TP}$  es de  $+5$  cmH<sub>2</sub>O. Tanto en C. como en D. la  $P_{TP}$  es positiva y se favorece que las vías aéreas estén abiertas. Es esperable que el gradiente alvéolo-boca sea mayor en una espiración forzada en reposo, por lo que si transcurre el mismo tiempo espiratorio se expulsa más volumen en el caso D. que en el C (12). La  $P_{IP}$  afecta todas las divisiones de la vía aérea, por lo que la  $P_{VR}$  se acerca más rápidamente a 0 cuanto más esfuerzo espiratorio se realice → En el caso D. El gradiente alvéolo-boca es mayor pero más rápidamente la  $P_{VR}$  se vuelve 0 o negativa, lo que haría que se colapse la vía aérea, pero esto no ocurre completamente, este punto sí puede desplazarse hacia vía aérea más periférica.  $P_A$ : presión alveolar,  $P_{IP}$ : presión intrapleural,  $P_{TP}$ : presión transpulmonar,  $P_{VR}$ : presión trans vía respiratoria.

verificar que al menos dos CVF presentan una diferencia no mayor de 0,15 l entre ellas y dos VEF<sub>1</sub> con una diferencia no mayor de 0,15 l entre ellas. Para que todo esto se cumpla es importante que el personal técnico que realiza las mediciones esté debidamente entrenado y logre motivar al paciente para que haga su mejor esfuerzo (19).

### CURVA FLUJO VOLUMEN

La curva de flujo volumen es la representación gráfica de un ciclo respiratorio de forma atemporal, en el cual el eje "x" corresponde al volumen pulmonar (l) y el eje "y" es el flujo (l/s) (24). Se compone de un asa ascendente de flujo espiratorio; y de un asa descendente inspiratoria. La maniobra estandarizada consiste en realizar una espiración forzada máxima cuando el sujeto se encuentra en capacidad pulmonar total, seguida de una rápida y profunda inspiración.

El análisis del asa superior se suele dividir en algunos segmentos que corresponden a procesos fisiológicos específicos y las alteraciones de estos se relacionan con cambios sugestivos de patrones obstructivos o restrictivos. Algunos de los datos que son claves en la interpretación de una curva flujo volumen son el flujo pico espiratorio y la morfología de la curva (25).

El pico de flujo espiratorio (PFE, Figura No. 2) se refiere al punto máximo de flujo que tiene el asa espiratoria y aumenta conforme lo hace el esfuerzo espiratorio (14,26,27). En este momento, el volumen pulmonar es cercano a la capacidad pulmonar total y la P<sub>V<sub>R</sub></sub> es alta, por lo que la vía aérea tiene mayor apertura y menor resistencia al flujo (27). Además, a volúmenes pulmonares altos existe un mayor retroceso elástico pulmonar lo que determina mayor presión alveolar y un mayor gradiente de presión alvéolo-boca. Las mayores disminuciones del PFE se observan en patrones obstructivos en los cuales se impacta directamente el flujo debido al aumento de la R<sub>V<sub>R</sub></sub> (24,28). El PFE disminuye ante patrones restrictivos, ya que en estos se reduce el volumen pulmonar total, lo mismo sucede si el sujeto no realiza la espiración

desde la capacidad pulmonar total si no desde un volumen menor (24).

La curvatura y los índices de curvatura corresponden al análisis de la rama descendente del asa espiratoria (RDAE, ver Figura No. 2) los cuales a su vez, coinciden con la parte del asa donde el flujo es independiente del esfuerzo. Su pendiente se relaciona con el aumento de la R<sub>V<sub>R</sub></sub> conforme se reduce el volumen pulmonar y con el fenómeno del cierre dinámico de la vía aérea (ver Figura No. 1C y 1D). Los patrones obstructivos generan que esta curva adquiera una conformación cóncava hacia arriba, incluso en personas asintomáticas (26,29,30).

En personas jóvenes y niños, la RDAE tiene una morfología más convexa y un flujo mayor que un adulto, lo que significa que existe mayor flujo a un mismo volumen pulmonar (29). Esto se explica por varias razones: (a) las personas jóvenes tienen una masa muscular fuerte que genera mayores presiones alveolares y un mayor gradiente de presión alvéolo-boca que las personas con edades avanzadas, (b) proporcionalmente con el volumen pulmonar, la vía aérea de los niños tiene mayor diámetro que la de los adultos, por lo que hay menor resistencia al flujo, (c) al aumentar la edad, disminuye el retroceso elástico pulmonar, lo que contribuye con el patrón obstructivo fisiológico del envejecimiento ya que el gradiente alvéolo-boca será menor (29,31).

Se ha descrito también que patrones obstructivos generan una porción terminal del asa descendente espiratoria más prolongada que los patrones normales, ya que la porción terminal del asa refleja el flujo de las vías aéreas de mediano y bajo calibre, y es en estas vías donde se manifiestan de forma temprana los patrones obstructivos (3,31).

De la curva también se pueden obtener otros parámetros como la CVF, el flujo forzado espiratorio al 50% de la CVF, pero solo en aquellas curvas que hayan cumplido los mismos criterios que se mencionaron en las pruebas pulmonares dinámicas. La información obtenida por este

método permite estimar el impacto que tienen posibles alteraciones en toda la maniobra (27).

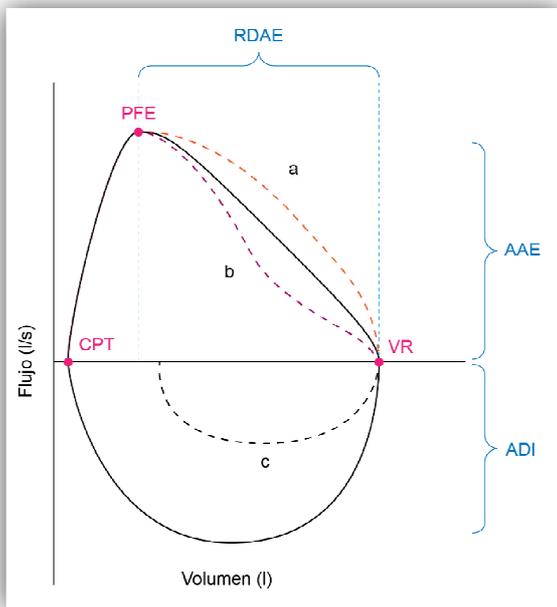
pacientes asmáticos, o con compresiones extratorácicas (28,32).

### CAMINATA DE LOS 6 MINUTOS

El ejercicio produce modificaciones cardiopulmonares que podrían desencadenar síntomas en personas con enfermedades pulmonares (33-35). Las diferentes pruebas de respuesta cardiopulmonar máxima al ejercicio y la caminata de los 6 minutos son algunas de las mediciones utilizadas para valorar la capacidad de realizar ejercicio (36). A pesar de que las pruebas de respuesta cardiopulmonar al ejercicio son el mejor método para la medición de la capacidad aeróbica, proveen una valoración global de la respuesta al ejercicio y evalúan los factores que lo limitan, requieren mayor cantidad de equipo y entrenamiento del personal (33-40). Además, en personas con enfermedad pulmonar obstructiva crónica moderada, la caminata de los 6 minutos produce un consumo de oxígeno similar que un *test* de respuesta máxima (41). La caminata de los 6 minutos es una opción más simple que brinda información que no puede ser obtenida por las pruebas pulmonares estáticas o dinámicas, constituye un escenario más cercano a la vida cotidiana y se ve influida tanto por factores musculoesqueléticos como voluntarios (42,43).

La caminata de los 6 minutos es un examen de respuesta submáxima al ejercicio con indicaciones que se podrían agrupar en: evaluación del estado funcional, medición de la respuesta a las intervenciones médicas, y como predictor de mortalidad y morbilidad. El parámetro principal de la prueba es la distancia que la persona recorre en 6 minutos, por lo que no se puede especificar sobre los procesos que ocasionan la alteración de la prueba. También se registra la frecuencia cardiaca basal, la presión arterial, la oximetría de pulso y la escala de Borg de disnea y de fatiga en las piernas (43,44).

En cuanto a los valores de referencia de las personas sanas, debe considerarse que la mínima diferencia en la distancia que es clínicamente significativa y la distancia que se relaciona con



**Figura No. 2.** Curva flujo-volumen.

Los puntos que son medidos en la curva flujo volumen son: AAE: asa ascendente espiratoria; ADI: asa descendente inspiratoria; CPT: capacidad pulmonar total; PFE: pico de flujo espiratorio; RDAE: rama descendente del asa espiratoria; VR: volumen residual. a. Representa la morfología de la RDAE en personas jóvenes. b. Representa la morfología de la RDAE en personas ancianas. c. Representa una curva inspiratoria con poco esfuerzo.

En cuanto al análisis del asa inspiratoria, se describen patrones de aplanamiento, truncamiento y ausencia del asa inspiratoria. El aplanamiento de la curva se correlaciona con procesos obstructivos extratorácicos, pero cuando se presentan aplanamientos tanto en asa espiratoria como inspiratoria se puede suponer la existencia de alguna obstrucción fija en la vía aérea, y se ha encontrado que la causa más común de esta morfología es la disfunción de cuerdas vocales. Por su parte, cuando hay truncamiento o ausencia del asa inspiratoria se correlaciona con procesos obstructivos de toda la vía aérea como en

**Tabla No. 2.** Modificaciones fisiológicas en el sistema respiratorio de personas adultas sanas no entrenadas durante el ejercicio.

1. La vasculatura pulmonar presenta alta distensibilidad y reclutamiento vascular, lo que permite que en condiciones de ejercicio (o cuando aumente el flujo sanguíneo pulmonar) ocurra disminución de la resistencia vascular pulmonar. El gasto cardíaco puede aumentar hasta aproximadamente 20 l/min, lo que condiciona que aumente la presión arterial sistémica y por lo tanto, la presión capilar pulmonar se eleva a una razón de 1 mmHg por litro de gasto cardíaco, esto quiere decir que puede aumentar hasta 20-25 mmHg **(51)**.
2. La elevación de la presión capilar pulmonar desde valores muy cercanos a los 9-12 mmHg en reposo hasta 20-25 mmHg cuando el gasto cardíaco es de 20 l/min, incrementa la presión neta de filtración. Sin embargo, en condiciones normales no ocurre edema pulmonar porque los pulmones presentan una gran capacidad de drenaje linfático **(51-53)**.
3. El volumen de sangre que se encuentra en los capilares pulmonares en reposo es de 70 ml. Cuando el gasto cardíaco es de 20 l/min, el volumen capilar pulmonar aumenta de 2 a 2,5 veces (máximo 3 veces el valor de reposo). Si el volumen capilar aumenta 2 veces pero el gasto cardíaco aumenta 4 veces, necesariamente disminuye el tiempo en que la sangre recorre los capilares pulmonares, no obstante, sí se alcanza el equilibrio difusional. Es decir, al final del capilar pulmonar la presión alveolar de O<sub>2</sub> y la presión capilar pulmonar de O<sub>2</sub> son iguales **(50,51)**.
4. La adaptación de la ventilación puede suceder por varias vías, pero la retroalimentación dada por fibras neurales tipo III y IV que inervan los músculos son claves en la respuesta al ejercicio **(49)**. La respuesta a estas señales incluye un aumento inicial del volumen corriente, seguido de un aumento en la frecuencia respiratoria. Según la intensidad del ejercicio, aumenta la contracción del diafragma y de los músculos intercostales hasta que se genera una presión intrapleurales inspiratoria máxima. En reposo, la espiración es pasiva, pero conforme aumenta la intensidad del ejercicio se reclutan músculos espiratorios como los abdominales hasta generar una presión pleural espiratoria máxima **(54,55)**. Los músculos respiratorios consumen el 10% del consumo de oxígeno cuando una persona no entrenada realiza ejercicio muy intenso **(56)**.
5. El comportamiento de la ventilación durante el ejercicio muestra que existe un acople entre la producción de CO<sub>2</sub> y la ventilación. No ocurre hipercapnia, pero puede presentarse una leve hipocapnia. La ventilación alveolar aumenta proporcionalmente más que la perfusión, lo que genera que la presión alveolar de O<sub>2</sub> y la presión de O<sub>2</sub> al final del capilar pulmonar sean relativamente mayores que en un sujeto en reposo. La relación ventilación/perfusión aumenta y se hace más uniforme entre los distintos segmentos pulmonares **(50,55)**.

mayor mortalidad son influidas por la edad, la estatura, el peso, el sexo y la condición clínica de la persona **(44,45)**. Un estudio que incluyó 444 personas sanas entre los 40-80 años, las cuales vivían en diferentes ciudades iberoamericanas, estableció parámetros de referencia para hombres y mujeres dependiendo de su edad que pueden ser consultados como parámetros de normalidad **(46)**.

Las respuestas cardiovasculares y respiratorias al ejercicio se encuentran mediadas por señales aferentes metabólicas desde los músculos

respiratorios y los grupos musculares utilizados en el ejercicio, así como por señales anticipatorias al ejercicio que se conocen como: comando central. Estas señales aferentes, además de producir un aumento en la ventilación alveolar y en la perfusión pulmonar (ver Tabla No. 2), generan respuestas competitivas en la distribución del flujo sanguíneo en los músculos respiratorios o en los músculos locomotores, es decir, que si aumenta el flujo sanguíneo a músculos respiratorios se reduce en los locomotores y viceversa **(47,48)**.

En una persona saludable, la ventilación no se considera una limitante al ejercicio, ya que incluso la ventilación podría ser ligeramente mayor que la producción de CO<sub>2</sub> (49). La limitación al ejercicio por determinantes respiratorios se relaciona con alteraciones en la ventilación, en la difusión de gases, en la vasculatura pulmonar o en el transporte y la distribución de oxígeno. Además, entre mayor sea la presión vascular pulmonar mayores repercusiones se producen sobre el ventrículo derecho y el intercambio gaseoso alveolo-arterial (50).

### CONCLUSIONES

Las pruebas de función pulmonar dinámicas dependen de la resistencia de la vía aérea. Las vías aéreas con diámetro superior a 2 mm ofrecen la mayor resistencia al flujo de aire, sin embargo; las enfermedades que aumentan la resistencia usualmente afectan a la vía aérea pequeña.

La resistencia de la vía aérea depende de factores descritos por la Ley de Poiseuille, así como de la retracción elástica pulmonar y factores que modulan el tono del músculo liso bronquial.

La curva flujo volumen describe el comportamiento del flujo en espiración y en inspiración. La morfología de la curva se correlaciona con factores que dependen de esfuerzo y/o que aumentan la resistencia de la vía aérea. Se emplea en el estudio de los trastornos obstructivos.

Además, la caminata de los 6 minutos representa un estudio que correlaciona con la capacidad de respuesta cardiopulmonar a un ejercicio submáximo. Las adaptaciones al ejercicio producen mayor demanda al sistema respiratorio, por lo cual durante el ejercicio pueden aparecer síntomas que no se manifestaban en reposo.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de la Dra. Catherine Ellis Wegley en la elaboración de las imágenes de este artículo.

### FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Los autores laboraron en la Escuela de Medicina, Universidad de Costa Rica durante la realización del artículo. No hubo fuentes externas de financiamiento.

### REFERENCIAS

1. Wanger J. Pulmonary function testing: a practical approach. 3rd ed. Jones & Bartlett Learning; 2012. p. 1-2.
2. Lutfi MF. The physiological basis and clinical significance of lung volume measurements. *Multidiscip Respir Med.* 2017;12(1):1-12.
3. Pellegrino R, Viegi G, Brusasco V, Crapo RO, Burgos F, Casaburi R, et al. Interpretative strategies for lung function tests. *Eur Respir J.* 2005;26(5):948-68.
4. Hankinson JL, Odencrantz JR, Fedan KB. Spirometric reference values from a sample of the general U.S. Population. *Am J Respir Crit Care Med.* 1999;159(1):179-87.
5. Rojas MX, Dennis RJ. Valores de referencia para parámetros de espirometría en la población adulta residente en Bogotá, D. C., Colombia. *Biomédica.* 2010;30:82-94. DOI: <https://doi.org/10.7705/biomedica.v30i1.156>
6. Degens P, Merget R. Reference values for spirometry of the European Coal and Steel Community: Time for change. *Eur Respir J.* 2008; 31: 687-688. DOI: 10.1183/09031936.00145507
7. Levitzky M. *Pulmonary Physiology.* 9th ed. USA: McGraw-Hill Education; 2018. p. 37-40.
8. Boron W, Boulpaep E. *Fisiología Médica.* 3rd ed. España: Elsevier S. L. U.; 2017. p. 608-609.
9. Lin CK, Lin CC. Work of breathing and respiratory drive in obesity. *Respirology.* 2012;17(3):402-11.
10. Hogg JC, Paré PD, Hackett T-L. The contribution of small airway obstruction to the pathogenesis of Chronic obstructive pulmonary disease. *Physiol Rev.* 2017;97(2):529-52.
11. Weibel E. *Morphometry of the Human Lung.* New York: Academic Press; 1963. 3,110,139. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-08161-3>
12. Voets PJGM, van Helvoort HAC. The role of equal pressure points in understanding pulmonary



- diseases. *Adv Physiol Educ.* 2013;37(3):266–7.
13. Ferraro F V., Gavin JP, Wainwright T, McConnell A. The effects of 8 weeks of inspiratory muscle training on the balance of healthy older adults: a randomized, double-blind, placebo-controlled study. *Physiol Rep.* 2019;7(9):1–12.
  14. Varga J, Casaburi R, Ma S, Hecht A, Hsia D, Somfay A, et al. Relation of concavity in the expiratory flow-volume loop to dynamic hyperinflation during exercise in COPD. *Respir Physiol Neurobiol.* 2016;234:79–84. DOI: 10.1016/j.resp.2016.08.005.
  15. West J, Andrew M. *West's Respiratory Physiology.* 10th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Business; 2016. p.128–132.
  16. Pampuch A, Milewski R, Rogowska A, Kowal K. Predictors of airway hyperreactivity in house dust mite allergic patients. *Adv Respir Med.* 2019;87(3):152–8.
  17. Dubois AB. Airway Resistance. *Am J Respir Crit Care Med.* 2000;162:345–6.
  18. Mitzner W. Mechanics of the lung in the 20th century. *Compr Physiol.* 2011;1(4):2009–27.
  19. Macintyre NR. Spirometry for the diagnosis and management of chronic obstructive pulmonary disease. *Respir Care.* 2009;54(8):1050–7.
  20. Crapo RO, Jensen RL. Standards and interpretive issues in lung function testing. *Respir Care.* 2003;48(8):764–72.
  21. Huprikar NA, Skabelund AJ, Bedsole VG, Sjulín TJ, Karandikar A V, Aden JK, et al. Comparison of the Forced and Slow Vital Capacity Maneuvers in Defining Airway Obstruction. *Respir Care.* 2019;67(7):786–92.
  22. Lutfi MF. Vital capacity derived spirometric measurements. *SMJ.* 2012;48(1):86–100.
  23. Li H, Liu C, Zhang Y, Xiao W. The Concave Shape of the Forced Expiratory Flow-Volume Curve in 3 Seconds Is a Practical Surrogate of FEV<sub>1</sub>/FVC for the Diagnosis of Airway Limitation in Inadequate Spirometry. *Respir Care.* 2017;62(3):363–9.
  24. Lefebvre Q, Vandergoten T, Derom E, Marchandise E, Liistro G. Testing Spirometers: Are the Standard Curves of the American Thoracic Society Sufficient? *Respir Care.* 2014;59(12):1895–904.
  25. Weiner DJ, Forno E, Sullivan L, Weiner GA, Kurland G. Subjective and objective assessments of flow-volume curve configuration in children and young adults. *Ann Am Thorac Soc.* 2016;13(7):1089–95.
  26. Junhasavasdikul D, Telias I, Grieco DL, Chen L, Gutierrez CM, Piraino T, et al. Expiratory Flow Limitation During Mechanical Ventilation. *Chest.* 2018;154(4):948–62.
  27. Johns D, Das A, Toelle B, Abramson M, Marks G, Wood-Baker R, et al. Improved spirometric detection of small airway narrowing: Concavity in the expiratory flow-volume curve in people aged over 40 years. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis.* 2017;12:3567–77.
  28. Sterner JB, Morris MJ, Sill JM, Hayes JA. Inspiratory flow-volume curve evaluation for detecting upper airway disease. *Respir Care.* 2009;54(4):461–6.
  29. Nève V, Matran R, Baquet G, Methlin CM, Delille C, Boulenguez C, et al. Quantification of shape of flow-volume loop of healthy preschool children and preschool children with wheezing disorders. *Pediatr Pulmonol.* 2012;47(9):884–94.
  30. Oh A, Morris TA, Yoshii IT, Morris TA. Flow Decay: A Novel Spirometric Index to Quantify Dynamic Airway Resistance. *Respir Care.* 2017;62(7):928–35.
  31. Nève V, Edmé JL, Baquet G, Matran R. Reference ranges for shape indices of the flow-volume loop of healthy children. *Pediatr Pulmonol.* 2015;50(10):1017–24.
  32. Campbell AH, Guy PA, Rochford PD, Worsnop CJ, Pierce RJ. Flow-volume curve changes in patients with obstructive sleep apnoea and brief upper airway dysfunction. *Respirology.* 2000;5(1):11–8.
  33. Balady GJ, Arena R, Sietsema K, Myers J, Coke L, Fletcher GF, et al. Clinician's Guide to Cardiopulmonary Exercise Testing in Adults. *Circulation.* 2010;122(2):191–225.
  34. Beltz NM, Gibson AL, Janot JM, Kravitz L, Mermier CM, Dalleck LC. Graded Exercise Testing Protocols for the Determination of VO<sub>2</sub> max: Historical Perspectives, Progress, and Future Considerations. *J Sports Med.* 2016;2016:1–12. DOI: 10.1155/2016/3968393.
  35. Ramos RP, Alencar MCN, Treptow E, Arbex F, Ferreira EM V., Neder JA. Clinical Usefulness of Response Profiles to Rapidly Incremental Cardiopulmonary Exercise Testing. *Pulm Med.* 2013;2013:1–25. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/359021>
  36. Guazzi M, Bandera F, Ozemek C, Systrom D, Arena R. Cardiopulmonary Exercise Testing: What Is its Value?



- J Am Coll Cardiol. 2017;70(13):1618-36.
37. Leclerc K. Cardiopulmonary exercise testing: A contemporary and versatile clinical tool. *Cleve Clin J Med.* 2017;84(2):161-8.
  38. Nelson N, Asplund CA. Exercise Testing: Who, When, and Why? *PM R.* 2016;8(3):S16-23. DOI: 10.1016/j.pmrj.2015.10.019.
  39. Ross RM, Beck KC, Casaburi R, Johnson BD, Marciniuk DD, Wagner PD, et al. ATS/ACCP Statement on Cardiopulmonary Exercise Testing. *Am J Respir Crit Care Med.* 2003;167(10):1451.
  40. Mezzani A. Cardiopulmonary exercise testing: Basics of methodology and measurements. *Ann Am Thorac Soc.* 2017;14(Supplement 1):3-11.
  41. Hill K, Dolmage TE, Woon L, Coutts D, Goldstein R, Brooks D. Comparing peak and submaximal cardiorespiratory responses during field walking tests with incremental cycle ergometry in COPD. *Respirology.* 2012;17(2):278-84.
  42. Rasekaba T, Lee AL, Naughton MT, Williams TJ, Holland AE. The six-minute walk test: a useful metric for the cardiopulmonary patient. *Intern Med J.* 2009;39(8):495-501.
  43. American Thoracic Society. ATS Statement: The Six-Minute Walk Test. *Am J Respir Crit Care Med.* 2002;166:111-7.
  44. Holland AE, Spruit MA, Troosters T, Puhan MA, Pepin V, Saey D, et al. An official European Respiratory Society/American Thoracic Society technical standard: field walking tests in chronic respiratory disease. *Eur Respir J.* 2014;44(6):1428-46.
  45. Singh SJ, Puhan MA, Andrianopoulos V, Hernandez NA, Mitchell KE, Hill CJ, et al. An official systematic review of the European Respiratory Society/American Thoracic Society: Measurement properties of field walking tests in chronic respiratory disease. *Eur Respir J.* 2014;44(6):1447-78.
  46. Casanova C, Celli BR, Barria P, Casas A, Cote C, De Torres JP, et al. The 6-min walk distance in healthy subjects: Reference standards from seven countries. *Eur Respir J.* 2011;37(1):150-6.
  47. Dominelli PB, Archiza B, Ramsook AH, Mitchell RA, Peters CM, Molgat-Seon Y, et al. Effects of respiratory muscle work on respiratory and locomotor blood flow during exercise. *Exp Physiol.* 2017;102(11):1535-47.
  48. Guyenet PG, Bayliss DA. Neural Control of Breathing and CO<sub>2</sub> Homeostasis. *Neuron.* 2015;87(5):946-61.
  49. Haouzi P. Theories on the nature of the coupling between ventilation and gas exchange during exercise. *Respir Physiol Neurobiol.* 2006;151(2-3):267-79.
  50. Dempsey JA. Respiratory Determinants of Exercise Limitation: Focus on Phrenic Afferents and the Lung Vasculature. *Clin Chest Med.* 2019;40(2):331-42.
  51. Naeije R, Chesler N. Pulmonary circulation at exercise. *Compr Physiol.* 2012;2(1):711-41.
  52. Robinson SK, Ramsden JJ, Warner J, Lackie PM, Roose T. Correlative 3D Imaging and Microfluidic Modelling of Human Pulmonary Lymphatics using Immunohistochemistry and High-resolution  $\mu$ CT. *Sci Rep.* 2019;9(1):1-14.
  53. Murray J. Pulmonary Edema Pathophysiology and Diagnosis. *Int J Tuberc Lung Dis.* 2011;15(2):155-60.
  54. Aliverti A. The respiratory muscles during exercise. *Breathe.* 2016;12(2):165-8.
  55. Ward SA. Ventilatory control in humans: Constraints and limitations. *Exp Physiol.* 2007;92(2):357-66.
  56. Dominelli PB, Render JN, Molgat-Seon Y, Foster GE, Romer LM, Sheel AW. Oxygen cost of exercise hyperpnoea is greater in women compared with men. *J Physiol.* 2015;593(8):1965-79.

## Correspondencia

**Monge Rodríguez, Silvia Leticia**

Correo electrónico: [silvia.monge.ro@gmail.com](mailto:silvia.monge.ro@gmail.com)

**Para publicar en esta Revista visite:**

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/medica>

