

VOLÚMENES PULMONARES

Isabel Cienfuegos Agustín, Salvador de la Torre Carazo

RESUMEN

Para asegurar el intercambio de gases, el aire debe ser movilizado periódicamente dentro y fuera de los pulmones.

Tanto en condiciones fisiológicas como en condiciones patológicas, el volumen de gas que ocupa los pulmones en reposo, o entra y sale de ellos tanto en respiración normal como forzada, depende de las características de los pulmones, de las características de la caja torácica y de la interacción entre ellos, así como de la función de los músculos respiratorios en reposo y a lo largo del ciclo de la respiración.

En este capítulo, se definen los diferentes compartimentos de volúmenes pulmonares, se revisan los factores que determinan los mismos, los equipos de medida disponibles, así como las técnicas más habituales y los procedimientos para realizar correctamente estas medidas.

Consideraremos también las indicaciones y contraindicaciones y la valoración de los resultados en su aplicación a la clínica para el diagnóstico de diferentes situaciones.

INTRODUCCIÓN

El intercambio de gases exige que el aire sea movilizado periódicamente dentro y fuera de los pulmones.

Tanto en condiciones fisiológicas como en condiciones patológicas, el volumen de gas que ocupa los pulmones en reposo o entra y sale de ellos tanto en respiración normal como forzada, depende de las características de los pulmones de las características de la caja torácica y de la interacción en entre ellos, así como de la función de los músculos respiratorios en reposo y a lo largo del ciclo de la respiración.

PRINCIPIOS FISIOLÓGICOS Y DEFINICIONES

Volúmenes y capacidades

Los principales volúmenes y capacidades, o suma de dos o más volúmenes, se describen a continuación (Fig. 1).

- **Volumen corriente (VT o Tidal volume)**. Es el volumen de gas que entra y sale de los pulmones en una respiración basal.
- **Volumen de reserva inspiratorio (IRV o Inspiratory reserve volume)**. Representa el volumen adicional de gas que puede introducirse en los pulmones al realizar una inspiración máxima desde volumen corriente.
- **Volumen de reserva espiratorio (ERV o Expiratory reserve volume)**. Es el volumen de gas adicional que puede exhalarse del pulmón tras espirar a volumen corriente.
- **Volumen residual (RV o Residual volume)**. Corresponde al volumen de gas que permanece dentro del pulmón tras una espiración forzada máxima.

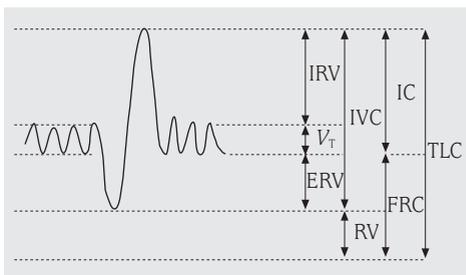


FIGURA 1. Volúmenes y capacidades sobre una curva espirométrica volumen/tiempo. VT: volumen corriente; IRV: volumen de reserva inspiratoria; ERV: volumen de reserva espiratoria; IC: capacidad vital inspiratoria; RV: volumen residual; IC: capacidad vital inspiratoria; FRC: capacidad residual funcional; TLC: capacidad pulmonar total.

- **Capacidad vital (VC o *Vital capacity*)**. Máximo volumen de gas pulmonar movilizable. Es la suma del volumen corriente y los volúmenes de reserva espiratoria y espiratoria. Dependiendo de la forma en que se considere, se diferencia **capacidad vital inspiratoria (VC o *inspiratory vital capacity*)**, que es el volumen de gas que puede ser introducido en el pulmón con un esfuerzo inspiratorio máximo, tras una espiración máxima lenta. La **capacidad vital lenta (SVC o *slow vital capacity*)** es el volumen de gas que puede ser exhalado del pulmón con un esfuerzo espiratorio máximo lento, tras un esfuerzo inspiratorio máximo. Y la más utilizada, **capacidad vital forzada (FVC o *forced vital capacity*)**, que supone el volumen de gas exhalado con un esfuerzo espiratorio máximo tras una inspiración máxima. En condiciones de normalidad, apenas existen diferencias entre las distintas modalidades de capacidad vital, pero sí puede haberlas cuando existe patología.
- **Capacidad inspiratoria (IC o *Inspiratory capacity*)**. Suma del volumen corriente y del volumen de reserva inspiratorio. Representa el máximo volumen inspirado tras una espiración tranquila.
- **Capacidad residual funcional (FRC o *Functional residual capacity*)**. Suma del volumen de reserva espiratorio y del volumen residual. Es el volumen de gas que hay dentro de los pulmones al final de una espiración tranquila y, como se mencionará después, corresponde al punto de equilibrio entre la retracción elástica del pulmón y de la caja torácica.
- **Capacidad pulmonar total (TLC o *Total lung capacity*)**. Abarca el volumen corriente, el volumen de reserva inspiratorio, el volumen de reserva espiratorio y el volumen residual. Es el máximo volumen de gas que pueden contener los pulmones.

Determinantes de los volúmenes pulmonares

La entrada del aire en el organismo para el posterior intercambio de gases depende de la

bomba ventilatoria toraco-pulmonar, un sistema formado por la caja torácica y los pulmones cuyas fuerzas de retracción elástica tienen signos opuestos. Dado que el pulmón y la caja torácica permanecen en íntimo contacto e interdependientes debido a la presión negativa del espacio pleural, los volúmenes pulmonares a lo largo del ciclo respiratorio estarán determinados por la interacción de sus fuerzas de retracción elástica (Fig. 2) y las producidas por la contracción de los músculos respiratorios.

Los volúmenes pulmonares también se ven afectados, dentro de la normalidad, por variables antropométricas y situacionales, que se mencionarán más brevemente.

Factores dependientes de la pared torácica

Elasticidad de caja torácica

La pared torácica incluye la caja torácica, constituida por las costillas, la columna vertebral y los músculos que la rodean, el diafragma y también la pared abdominal.

De hecho, la caja torácica incluye al abdomen, como un sistema bicompartimental separado por el diafragma⁽¹⁾, de modo que la presión elástica de la pared torácica (Pw) es el resultado de la presión elástica de la pared abdominal (Pab) y de la presión elástica de la caja torácica (Prc) que se relacionan según la fórmula expresada por Mead⁽²⁾.

$$Pw = (1-k) Prc + kPab$$

La pared torácica es una estructura elástica que tiende a recuperar su forma cuando se le aplican fuerzas que varían su situación de reposo. La presión de retroceso elástico de la pared torácica varía a lo largo del ciclo respiratorio, tanto en sentido como en magnitud (Fig. 2).

Músculos respiratorios

La musculatura respiratoria está constituida por los músculos intercostales, el diafragma, los escalenos, el esternocleidomastoideo y otros músculos accesorios y los músculos abdominales.

Los músculos intercostales externos han sido considerados inspiratorios, mientras que

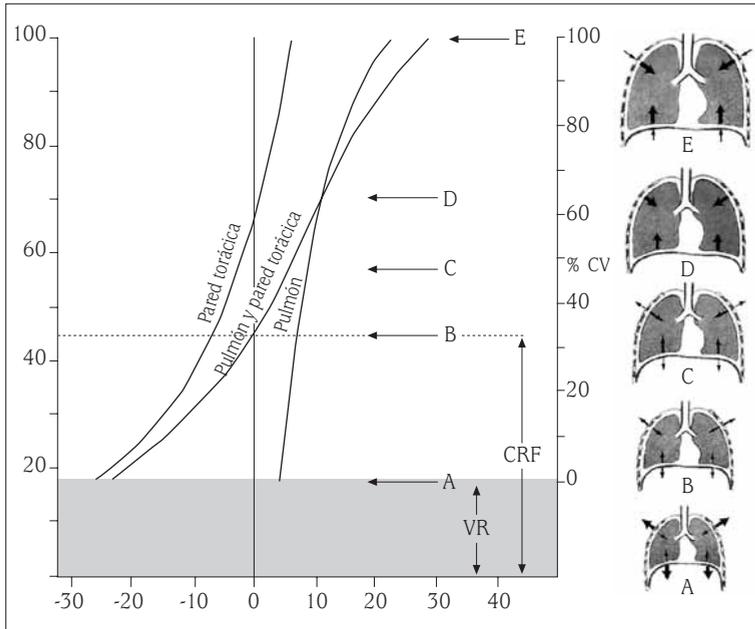


FIGURA 2. Curvas de presión de retroceso elástico pulmonar, de la pared torácica y del sistema respiratorio. Dirección de las fuerzas de retroceso elástico en diferentes momentos del ciclo respiratorio (a la derecha). A) Volumen residual. B) Capacidad funcional residual. C) Inspiración inicial. D) 70% de la capacidad pulmonar total. E) Capacidad pulmonar total.

a los internos se les ha atribuido una función espiratoria, salvo en la porción paraesternal. La realidad es ligeramente más compleja, ya que su función depende de la acción de otros músculos y de la posición de las costillas⁽³⁾.

El diafragma parte de una estructura tendinosa central desde la que se irradian sus fibras para insertarse periféricamente en las vértebras lumbares, en el apéndice xifoides y en las últimas costillas. Su contracción expande caudalmente la caja torácica, disminuyendo la presión intrapleurar y dando lugar a la inspiración. La rotación externa y elevación que provoca la manera en que se inserta en la pared costal contribuye también a la expansión de la caja torácica y a la entrada del aire y, aunque en la caja costal superior tiene un ligero efecto espiratorio, debido a cierta retracción pasiva al caer la presión pleural, su función es netamente inspiratoria. En conjunto, el diafragma actúa de forma sinérgica con los músculos intercostales⁽⁴⁾. La contracción del diafragma, además, tiene efectos sobre la pared abdominal. Su contracción la expande hacia fuera, mientras que su relajación tiene el efecto contrario.

Otros músculos con función inspiratoria son el esternocleidomastoideo, los escalenos, los trapecios, los serratos y, eventualmente, algunos músculos laríngeos.

Los músculos abdominales son, en principio, espiratorios. Sin embargo, contribuyen a la inspiración al relajarse al final de la espiración y con su contracción tónica ayudan a mantener la longitud más adecuada para la contracción del diafragma en bipedestación.

Desplazamientos y cambios de volumen

Como consecuencia de la contracción de los músculos respiratorios, se produce un desplazamiento del diafragma, la pared costal y la pared abdominal, lo que determina un cambio de volumen en la caja torácica.

Por un lado, las costillas experimentan movimientos de elevación y desplazamientos laterales que incrementan los diámetros anteroposteriores y laterales del tórax^(1,5), y el descenso del diafragma, además de contribuir a la expansión del tórax, desplaza la pared abdominal hacia afuera al descender.

El cambio de volumen total de la caja torácica (ΔV_w) y, por tanto, el cambio de volumen

pulmonar dependen de los cambios en el volumen de la caja costal (ΔV_{rc}) y de la pared abdominal (ΔV_{ab}), según la relación:

$$\Delta V_w = \Delta V_{rc} + \Delta V_{ab}$$

La relación entre la expansión de la caja costal y la de la pared abdominal fueron estudiadas por Mead y Kono^(6,7), quienes midieron el desplazamiento costal y abdominal, encontrando que para un volumen determinado, su relación permanece constante en diferentes puntos y, para incrementos de volúmenes iguales, las líneas de relación entre ambos desplazamientos son rectas paralelas y equidistantes. De hecho, es posible obtener la relación gráfica de desplazamiento de cada parte para diferentes patrones de comportamiento muscular moviendo uno de los componentes y dejando el otro fijo a lo largo de las líneas isovolumen.

Es por ello que, cuando se da un movimiento paradójico del diafragma, con elevación durante la inspiración y retracción abdominal, la expansión de la caja torácica es mayor.

También los movimientos de flexo-extensión de la columna modifican los volúmenes pulmonares, disminuyendo el volumen conforme aumenta la flexión del tórax.

Factores dependientes de los pulmones

La contracción de los músculos respiratorios produce cambios en la presión pleural. Estos cambios están condicionados por las características elásticas de la caja torácica y se transmiten a los alvéolos originando un cambio en la presión alveolar. La diferencia entre ésta y la presión en la boca genera un flujo de aire y el consiguiente cambio en el volumen pulmonar. El cambio producido va a depender de las características elásticas del pulmón.

Al igual que la caja torácica, el pulmón es una estructura elástica. Los cambios de presión debidos al retroceso elástico del pulmón a diferentes volúmenes fueron medidos por Gibson y Pride⁽⁸⁾ utilizando un catéter esofágico para valorar los cambios en la presión pleural a diferentes volúmenes estáticos medidos en un pletismógrafo. La curva resultante, en

condiciones de normalidad, se ofrece en la figura 2. En condiciones patológicas, la curva cambia reflejando la alteración del retroceso elástico⁽⁹⁾.

Interacción toraco-pulmonar a lo largo del ciclo respiratorio

En la figura 2 también se representa la curva resultante de la interacción de la presión de retroceso elástico de la pared torácica y de los pulmones a lo largo del ciclo respiratorio^(9,10). Esta interacción va a ser determinante de los volúmenes pulmonares en un momento dado. Antes de iniciarse la inspiración, cuando el sujeto se encuentra en capacidad residual funcional (FRC), se equilibran ambas fuerzas con sentidos contrarios. La fuerza centrípeta de retroceso elástico pulmonar compensa a la centrífuga de retroceso elástico de la pared torácica. Es el punto de equilibrio y ausencia de flujo. Al inicio de la inspiración, la fuerza de retroceso elástico de la pared torácica se ve potenciada por la generada por la contracción de los músculos inspiratorios, con lo que el tórax y los pulmones se expanden. Esto es así hasta que se alcanza aproximadamente el 70 % de la TLC. Si continúa la insuflación, a partir de ese momento, la fuerza de retroceso elástico de la pared torácica se suma al retroceso elástico pulmonar, oponiéndose a la expansión del tórax de modo que, para alcanzar una inspiración máxima, se tienen que vencer ambas fuerzas. A TLC la fuerza muscular ya no es capaz de vencer el retroceso elástico del pulmón y del tórax, y se inicia la espiración (Fig. 2).

La espiración, tanto desde TLC como desde un volumen corriente, es un proceso pasivo al cesar la contracción de los músculos inspiratorios y actuar la fuerza de retroceso elástico pulmonar. A partir de FRC, la espiración requiere de la contracción de los músculos espiratorios para vencer la fuerza de retroceso elástico de la caja torácica. Finalmente, hay un volumen que no puede expulsarse, el RV, que viene determinado por las fuerzas de retracción elástica del tórax y por las fuerzas tensoactivas del fluido de revestimiento alveolar, que impiden

el colapso alveolar y que actúan en el mismo sentido.

Otro factor determinante del RV, especialmente en ancianos⁽¹¹⁾ y en enfermedades que disminuyen el retroceso elástico pulmonar, es el cierre precoz de la vía aérea.

Por otro lado, la presión pleural no es uniforme a lo largo de la caja torácica sino que es más negativa en los vértices que en las bases, con una diferencia de hasta 5 cm H₂O, en parte por la gravedad y en parte por las diferencias morfológicas entre el tórax y el pulmón. Esto hace que los alvéolos de los vértices estén más distendidos y que en los alvéolos de las bases se produzcan más cambios de volumen, debido a la acción de los músculos respiratorios. Así, los vértices pulmonares contribuyen más al RV y las bases más a la VC y a la TLC⁽¹²⁾.

Otros factores de variabilidad

En condiciones fisiológicas, existen otros factores que influyen sobre los volúmenes pulmonares de un individuo concreto.

La edad es uno de ellos. Los volúmenes pulmonares aumentan entre los 18-20 años⁽¹³⁾. En edades avanzadas, la disminución del retroceso elástico pulmonar y el colapso precoz de la vía aérea aumentan el RV y la FRC. La VC también disminuye. La disminución del retroceso elástico de la caja torácica mantiene la TLC⁽¹¹⁾.

La contribución de los factores antropométricos también es bien conocida. Los volúmenes pulmonares son dependientes de la talla⁽¹⁴⁾, mientras que el peso influye en situaciones extremas. La obesidad importante disminuye el ERV y la FRC, en relación al índice de masa corporal⁽¹⁵⁾, y la TLC podría estar ligeramente disminuida, por falta de expansión torácica⁽¹⁶⁾. El efecto de la desnutrición sobre los volúmenes pulmonares resulta menos conocido, aunque en jóvenes, se ha relacionado un índice de masa corporal bajo con reducciones de la VC, que revierten al mejorar el estado de nutrición⁽¹⁷⁾. En general, los volúmenes pulmonares son menores en mujeres que en hombres, probablemente por diferencias en

la contracción pulmonar y en las fuerzas de retracción elástica.

La etnia influye en todos los volúmenes, hasta el punto de resultar necesarias ecuaciones de valores de referencia específicas del grupo étnico estudiado^(18,19).

Otros factores a considerar son la posición, el sueño, el ejercicio, el nivel de entrenamiento y la altitud. En decúbito, la FRC disminuye un 20-25% con respecto a la sedestación, por la compresión del contenido abdominal y el aumento del flujo sanguíneo⁽²⁰⁾. Esto también hace disminuir la VC en un 7-8%⁽²¹⁾. Con independencia de la postura, el sueño disminuye la FRC un 15%^(17,22). En adultos sanos, la FRC disminuye por la actividad muscular⁽²³⁾, mientras que en sujetos mayores el comportamiento puede ser más errático⁽¹¹⁾. El entrenamiento aumenta la TLC, la FRC y la FVC en niños y jóvenes^(17,24,25), quizá debido a un aumento de unidades alveolares. En adultos, puede haber ligeros incrementos en la VC y la TLC relacionados con mejoras en los músculos respiratorios⁽¹⁷⁾. Por último, en sujetos que viven en grandes alturas durante su crecimiento, la TLC es alrededor de un 7% mayor, sobre todo a expensas de la FRC y el RV y algo menos de la FVC, probablemente por adaptación^(17,26).

Influencia de los factores determinantes en los diferentes volúmenes

A modo de resumen, los volúmenes máximos, la TLC y la VC están determinados por la contracción muscular inspiratoria, que disminuye a volúmenes extremos, y por la retracción elástica de la pared torácica y de los pulmones que, en el momento de máxima expansión se suman⁽²⁷⁾. Los volúmenes pulmonares mínimos y el RV están determinados por el balance entre la contracción de los músculos espiratorios y la fuerza de retracción elástica de la caja torácica⁽²⁸⁾ junto a la contracción de los músculos antagonistas⁽²⁹⁾, con una participación del cierre precoz de la vía aérea en sujetos mayores⁽¹¹⁾. La FRC está determinada por el equilibrio entre las fuerzas de retroceso elástico del pulmón y de la caja torácica, así

como por el tono basal de los músculos inspiratorios, siendo en adultos jóvenes el 50 % de la TLC.

MEDIDA DE LOS VOLÚMENES PULMONARES

El registro de los volúmenes pulmonares estáticos se inició en 1800, con Davy. Los métodos de dilución datan de mediados de los años cuarenta del siglo XX. Una década después, DuBois introdujo el pletismógrafo^(30,31).

Pletismografía

Fundamentos de la técnica

Se basa en la ley de Boyle-Mariotte: a temperatura constante, el volumen de un gas (V) es inversamente proporcional a su presión (P), y, por tanto, su producto permanece constante: $P \times V = k$

De modo que, si hay cambios de situación de 1 a 2, se cumple que $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$.

Habitualmente, se utiliza la medida a volumen constante, empleando cabinas herméticas de volumen conocido (Fig. 3) en las que una válvula permite interrumpir el flujo del aire a FRC. En este punto, se realizan maniobras suaves que comprimen y descomprimen el gas contenido en el tórax y se miden los cambios de presión en la cabina y en la boca (en ausencia de flujo, la presión en la boca refleja los cambios en la presión alveolar).

En estas condiciones, se mide el volumen de gas intratorácico TGV (*thoracic gas volume*).

Denominando:

P_1 = presión en la boca sin comprimir el tórax (igual a la presión alveolar, puesto que no hay flujo) y, por tanto, $P_1 = P$ atmosférica - P de vapor de agua a 37°C, medida en cmH₂O.

P_2 = presión en la boca con el tórax comprimido.

V_1 = volumen de gas intratorácico (TGV) a capacidad residual funcional: FRC (sin comprimir el tórax).

V_2 = volumen de gas con el tórax comprimido.

ΔV = variación de volumen torácico cuando se comprime el tórax (igual a la variación

del volumen de aire situado entre el paciente y las paredes de la cabina). Estos cambios de volumen son proporcionales a los cambios de presión en la cabina (Pc), al ser ésta hermética y de volumen constante.

ΔP_b = variación de presión en la boca al comprimir el tórax.

ΔP_c = variación de presión en cabina al comprimir el tórax.

C = factor de conversión entre la variación de presión y la variación de volumen, calculado durante la calibración de la cabina (relacionado con el volumen de la cabina, el volumen del paciente y la presión atmosférica).

A partir de estos valores y asumiendo una situación de temperatura constante, se calcula:

$$P_1 \times V_1 = (P_1 + \Delta P_b) + (V_1 - \Delta V)$$

que, simplificando:

$$P_1 \times \Delta V - V_1 \times \Delta P_b + \Delta V \times \Delta P_b = 0$$

y despejando V_1 :

$$V_1 = (\Delta V / \Delta P_b) \times (P_1 + \Delta P_b)$$

Dado que el ΔP_b es muy pequeño en comparación con P_1 , se puede despreciar. Por tanto:

$$V_1 = (\Delta V / \Delta P_b) \times P_1$$

y, lo que es lo mismo;

$$V_1 = P_1 / (\Delta P_b / \Delta V)$$

Como se mencionó, se puede determinar un factor de conversión (C) entre variación de presión y variación de volumen y, dado que los cambios de volumen pulmonar son proporcionales a los cambios de presión en cabina, la ecuación queda:

$$V_1 = C / (\Delta P_b / \Delta P_c)$$

$$V_1 (\text{TGV}) = C / \text{tangente de } \alpha$$

Basándose en este desarrollo, los equipos de pletismografía proporcionan una gráfica en la que los cambios de presión en cabina y en la boca forman un ángulo en cada maniobra, cuya tangente sería $\Delta P_b / \Delta P_c$ (Fig. 3).

Equipo, requerimientos técnicos y calibrado

Los equipos más habituales en la clínica son cabinas herméticas (medida a volumen constante) provistas de transductores de presión en boca (Pb) y cabina (Pc), así como de



FIGURA 3. Pletismógrafo. En pantalla: curvas que dibujan las variaciones de presión en la boca con respecto a la presión en cabina. Su ángulo de inclinación permite calcular la FRC.

un neumotacógrafo, que debe cumplir las características estándar de cualquier espirómetro^(32,33). Los requisitos técnicos mínimos de cualquier pletismógrafo también se recogen en las normativas nacionales e internacionales^(34,35). A su vez, en las mismas se detallan los requerimientos necesarios de personal y las recomendaciones de higiene y mantenimiento de los equipos^(34,36,37).

Previo a la calibración, es necesario introducir la presión atmosférica, temperatura y humedad relativa del aire y el equipo debe calentarse durante 30-40 minutos. Se comprobarán la ausencia de fugas y corrientes, el cierre hermético de la cabina y que la resistencia del tapón de oclusión sea mínima. A diario, se recomienda calibrar:

- Volumen: con una jeringa de calibración de tres litros. La precisión debe ser menor del 3%.
- Presión en boca y en cabina (transductores). Se utilizará un manómetro que registre ± 30 cm H₂O y una pequeña jeringa

calibrada (25-50 ml). Las variaciones no deben ser mayores de $\pm 1\%$. Aplicando 3 cmH₂O, el cambio de volumen debe ser < 10 ml/min.

- Constante de tiempo. Se evalúa inyectando un volumen conocido de aire en cabina y se mide el tiempo que la señal tarda en decaer (al 37 o al 50%, según equipos). Este periodo no debe ser muy corto (fugas y potencial infraestimación de los volúmenes) ni muy largo (inestabilidad de la señal en cabina).

Además, es preciso verificar la linealidad de los analizadores. Para ello, se introducen diferentes volúmenes y presiones y se comprueba que no originan desviaciones significativas.

Mensualmente, conviene calibrar con personas patrón, sanas y no fumadoras, siendo aceptables variaciones $< 5\%$ para la FRC y TLC y $< 10\%$ para el RV, respecto a las medidas previas.

Existen simuladores pulmones isotérmicos que permiten introducir variaciones de volumen entre 50 y 100 ml, variando la frecuencia de inyección de 0,5 a 5,0 Hz y comprobar que la medida es correcta a todas las frecuencias. También hay descompresores explosivos que permiten calibrar el volumen a diferentes flujos.

Procedimiento de medida

Se explica la maniobra al paciente, que debe estar cómodamente sentado dentro de la cabina sin flexionar o extender el cuello. Hay que utilizar pinzas nasales y es recomendable una boquilla "tipo buzo" para evitar fugas. El paciente debería sujetar las mejillas con las manos para evitar cambios añadidos de presión en la boca con las maniobras respiratorias (Fig. 3). Tras cerrar la puerta de la cabina, se espera un tiempo para que el paciente se relaje y se establezca térmicamente la cabina antes de indicarle que se introduzca la boquilla y se coloque la pinza nasal.

En estas condiciones, se le solicita que respire con tranquilidad hasta que alcance un nivel estable al final de la espiración (4

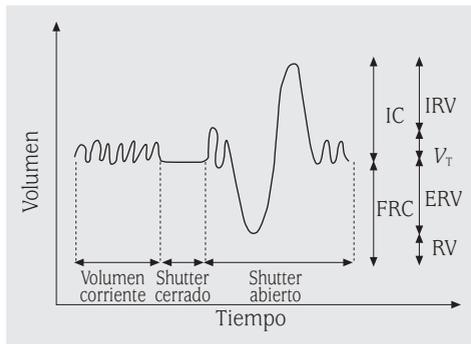


FIGURA 4. Espirograma durante una pletismografía. Se aprecia el momento de cierre del flujo aéreo por el obturador (o *shutter*) para realizar la maniobra.

a 10 respiraciones a VT que varíe menos de 100 ml). Al final de una espiración, cuando el paciente esté próximo a la FRC, se activa un interruptor que ocluye el flujo aéreo durante 2-3 segundos. Durante este cierre, se le solicita que efectúe maniobras de “jadeo suave” (± 1 kP o 10 cm H₂O, nunca más de ± 2 kP o 20,4 cm de H₂O) a una frecuencia de ≈ 60 ciclos/min (1 Hz). Las frecuencias de jadeo mayores de 1,5 Hz pueden llevar a errores y las más bajas causan problemas con la fuga controlada del pletismógrafo. Hay que realizar una serie de 3 a 5 maniobras de jadeo satisfactorias. Tras esto, se abre el obturador del flujo aéreo y se le indica que espire profundamente hasta RV y luego inspire tranquila y profundamente hasta VC (Fig. 4). Se aconseja medir la IC y valorar la FRC al menos cinco veces. La media de todas las FRC se suma a la IC mayor de los cinco ensayos, para obtener la TLC.

Criterios de calidad

Para asegurar la calidad de la medida deben cumplirse los siguientes criterios de reproducibilidad:

- Variabilidad de la medida del TGV $< 5\%$.
- Diferencia entre las dos maniobras más altas de VC < 200 ml.
- Variación de las dos medidas mayores de IC y ERV $< 5\%$ o 60 ml.
- Variación de la TLC $< 5\%$.

Se debe elegir:

- TGV: media de tres o más maniobras que difieran $< 5\%$ de la media.
- IC: el mayor valor de tres intentos reproducibles.
- TLC: suma de la media de TGV y mayor IC. Se debe prestar atención:
- A las variaciones horarias en la función: indicar en el informe la hora.
- A la perforación de tímpanos: genera una fuga que altera la medida.
- A la sobreestimación de la TGV si el jadeo se hace solo con musculatura intercostal, por lo que es mejor utilizar también la abdominal.

Parámetros obtenidos

En el momento del cierre, el pletismógrafo mide el volumen de gas intratorácico: TGV (*thoracic gas volume*) al final de una espiración no forzada, lo que equivale a la FRC. Al realizar una espirometría posterior, se calcula el RV restando la FRC. La TLC se obtiene sumando el volumen residual a la VC.

Dilución en circuito cerrado: helio

Fundamentos de la técnica

Se basa en la ley de conservación de masas, según la que, a temperatura constante, la masa de un gas no varía. Es decir, el producto del volumen por la concentración permanece constante.

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

Para realizar la medida, se utiliza un espirometro con una mezcla conocida de aire y helio. Una vez conectado al circuito, el paciente respirará a través de la boquilla hasta que se igualen las concentraciones de helio en el equipo y en sus propios pulmones. Se miden las concentraciones alcanzadas tras la dilución, final de una respiración a volumen corriente, es decir, a FRC (Fig. 5).

Siendo: V_{sp} : volumen del espirometro antes de añadir aire. V_{air} : volumen de aire agregado. F_{spHe1} : concentración inicial de He. F_{spHe2} : concentración de He tras añadir aire. F_{spHe3} : concentración de He al final de la exploración y V_{as} : espacio muerto del sistema (válvula y

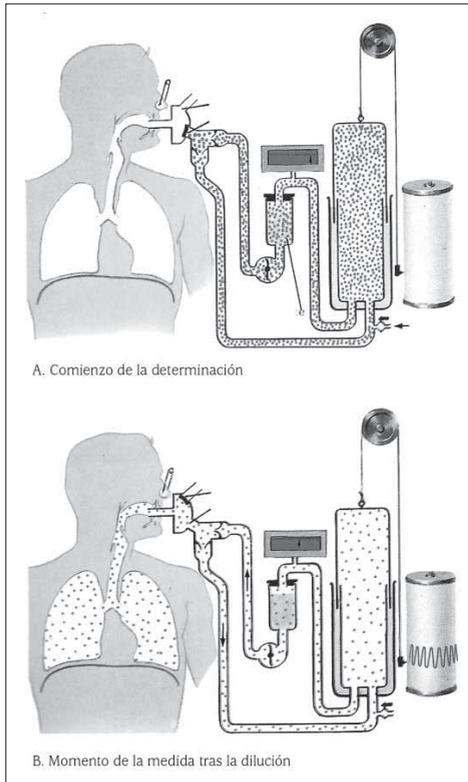


FIGURA 5. Cálculo de la FRC con la técnica de dilución de helio.

boquilla), el V_L el volumen de aire cuando el paciente se conecta al equipo (FRC) se calcula:

$$V_{sp} = V_{air} \times F_{spHe2} / (F_{spHe1} - F_{spHe2})$$

$$V_L = V_{air} \times F_{spHe1} \times (F_{spHe2} - F_{spHe3}) / [F_{spHe3} \times (F_{spHe1} - F_{spHe2})] - V_{ds}$$

Equipo y requerimientos técnicos

El equipo debe disponer de espirómetro, bomba de circulación del gas, absorbentes de agua y anhídrido carbónico, sistema que aporte helio y oxígeno, analizador de helio, termómetro, válvula y boquilla, según se detalla en las normativas SEPAR y ERS/ATS^(34,35).

Procedimiento de medida

1. Encender el equipo, respetar el tiempo de calentamiento. Calibrar.
2. Explicar el procedimiento, ajustar la boquilla (mejor "tipo buzo") y pinzar la nariz.

3. Tras la familiarización del paciente, al final de una espiración a volumen corriente, se le conecta el circuito. Se le solicitará que respire a volumen corriente, compensando el consumo de oxígeno.
4. Se registra la disminución de la concentración de helio cada 15 segundos. Se considerará que se ha alcanzado el equilibrio cuando la variación en la concentración del helio sea $\leq 0,02\%$ durante 30 s. Se desconecta del circuito en ese momento.

Criterios de calidad

Realizar:

- Al menos dos estudios de FRC con diferencias menores de 200 ml.
- Tres maniobras de ICV recogiendo el mayor valor.
- Tres maniobras de ERV recogiendo el valor medio.

Hay que evitar fugas, iniciar la prueba a FRC y corregir posibles errores debidos al aporte de O_2 . Es conveniente medir los coeficientes de variación intrasujeto en cada laboratorio.

Parámetros obtenidos

Conociendo FRC (V_L) y realizando una espirometría, se calculan el resto de volúmenes y capacidades, que deben expresarse en condiciones BTPS (presión, temperatura corporal y saturación de vapor de agua).

Dilución en circuito abierto: lavado de nitrógeno

Fundamentos de la técnica

Es un procedimiento menos habitual, que también se basa en la ley de conservación de masas y para el que existen diferentes modalidades⁽⁵⁸⁾.

Se realiza haciendo respirar al paciente O_2 al 100% y midiendo en el gas espirado las concentraciones decrecientes de N_2 , hasta llegar a un mínimo estable. Se puede conocer el volumen (FRC) en el que estaba contenido el N_2 que se va "lavando", dado que la concentración inicial de N_2 en el aire ambiente es 0,8.

Siendo $FN_{2\text{final}}$: fracción del gas al final de la prueba. V_{esp} : volumen total espirado. $FN_{2\text{esp}}$: concentración de N_2 en el aire exhalado. $N_{2\text{tej}}$: la pequeña proporción N_2 generado en los tejidos (y calculado sobre la superficie corporal).

$$FRC \times 0,8 = FRC \times FN_{2\text{final}} + V_{\text{esp}} \times FN_{2\text{esp}} - N_{2\text{tej}}$$

Equipo y requerimientos técnicos

Los mínimos requerimientos técnicos vienen detallados en las normativas vigentes⁽³⁵⁾.

Procedimiento de medida

Una vez calibrado el equipo, se conecta al paciente y se le colocan las pinzas nasales.

Tras varias respiraciones a volumen corriente, al final de una espiración se inician las inspiraciones de O_2 al 100 % monitorizando la concentración de N_2 del aire espirado e inspirado (que debiera ser nula). La prueba se considera que ha llegado a su término cuando la concentración de N_2 exhalado es $< 1,5\%$ durante al menos 3 espiraciones sucesivas.

Otros métodos menos habituales: técnicas de imagen

Desde una perspectiva clínica, son imprecisas y poco utilizadas⁽³⁹⁾. En una radiografía de tórax, se puede medir la TLC, por planimetría o dividiendo el tórax en formas geométricas. También se han desarrollado procedimientos matemáticos para estimar los volúmenes pulmonares a partir de una tomografía computarizada o de una resonancia magnética⁽³⁵⁾, pero la radiación y el coste limitan su uso.

Comparación entre métodos

Es necesario conocer los fundamentos de cada técnica para valorar las diferencias entre ellas ya que, debido a su coste, no siempre se puede disponer de la totalidad. En sujetos normales y en patología restrictiva, los valores obtenidos por los métodos de dilución y la pletismografía son similares. En pacientes obstruidos, se obtienen valores más altos con la pletismografía, ya que mide también el gas que no está en contacto con el exterior, mientras que los

métodos dilucionales infraestiman el volumen pulmonar⁽⁴⁰⁾. En estos casos, la diferencia entre los valores obtenidos por pletismografía y dilución puede ser usada en la clínica para estimar el volumen del “gas atrapado”⁽³⁴⁾, lo que puede ser muy útil en pacientes con grandes bullas.

También se han descrito valores más altos por pletismografía en mujeres embarazadas, habiéndose atribuido esto a un cierto grado de atrapamiento aéreo⁽⁴¹⁾.

En cuanto a la medida de los volúmenes pulmonares por técnicas de imagen y, pese a existir valores teóricos⁽⁴²⁾, no se recomienda su uso en la práctica clínica, por su elevada variabilidad.

INDICACIONES, CONTRAINDICACIONES Y COMPLICACIONES

Indicaciones

- Establecer con seguridad el diagnóstico de una alteración ventilatoria restrictiva y la magnitud de la restricción real en los patrones espirométricos de alteración mixta.
- Caracterizar el patrón de alteración funcional en enfermedades restrictivas.
- Ayudar en la interpretación de otras pruebas dependientes del volumen.
- Detectar precozmente limitación al flujo aéreo. En pacientes con riesgo de enfermedad pulmonar obstructiva crónica (déficit de α_1 -antitripsina), se ha observado un aumento del RV con una espirometría normal.
- Detectar respuesta a broncodilatadores y monitorizar respuestas a intervenciones terapéuticas.
- Delimitar el “gas atrapado”. Combinando las medidas por pletismografía y dilución puede, además, cuantificarse el espacio aéreo no ventilado.
- Establecer un pronóstico, valorar el riesgo quirúrgico y ayudar en la valoración de la incapacidad laboral.

Contraindicaciones y complicaciones

Las complicaciones de los procedimientos de medida son comunes a la espirometría^(32,33). Se consideran contraindicaciones:

- Imposibilidad de colaborar en la maniobra o enfermedad que interfiera con la correcta realización (tos o náuseas, por ejemplo).
- Hemoptisis reciente o neumotórax tratado con drenaje.
- Aneurismas o patología cardiovascular inestable.
- Cirugía reciente torácica o abdominal.
- Fugas por traqueostomía o lesiones en el macizo facial.
- Claustrofobia o impedimentos de cualquier clase para entrar en la cabina pletismográfica.

VALORES DE REFERENCIA E INTERPRETACIÓN

Para interpretar los volúmenes pulmonares, es importante elegir valores de referencia adecuados, lo que no siempre resulta fácil. Una discusión amplia del tema se ofrece en la literatura^(14,36,43). Es importante que estos valores se hayan obtenido en poblaciones similares a las que estudiemos. En nuestro medio⁽³⁴⁾, se proponen como más adecuadas las de la ERS⁽⁴⁴⁾, o las de Roca⁽⁴⁵⁾ u otras realizadas en poblaciones españolas⁽⁴⁶⁾. También es importante comparar con valores obtenidos por la misma técnica de medida que estemos utilizando, y sería muy conveniente validarlas en nuestra propia población. En pacientes de edades avanzadas sería necesario elegir las realizadas en ese rango de edad^(47,48). Hay que tener en cuenta en valores extremos (por ejemplo de talla), ya que no está claro que se puedan aplicar los valores de normalidad fuera del rango de la población estudiada. También es importante introducir factores de corrección en función de la raza, si es que no se dispone de ecuaciones aplicables. En cualquier caso debe quedar claro que valores de referencia se están utilizando en cada paciente, y asegurarse de la validez del estudio antes de interpretar los resultados.

Se pueden valorar los resultados como porcentaje del valor de referencia pero, teniendo en cuenta los límites de la normalidad⁽³⁴⁾. Un resumen de la evaluación de los volúmenes pulmonares estáticos, según los criterios esta-

TABLA 1. Valoración de los volúmenes pulmonares según las recomendaciones de la SEPAR

A. Rango de referencia o normalidad

TLC	80 - 120 % del valor de referencia
FRC	65 - 120 % del valor de referencia
RV	65 - 120 % del valor de referencia

B. Patrones de afectación

Restricción	TLC < 80 % del valor de referencia
Hiperinsuflación	RV/TLC > 120 % del valor de referencia FRC > 120 % del valor de referencia

C. Grados de restricción, según el valor de la TLC

Ligera	< LIN pero $\geq 70\%$ del valor de referencia
Moderada	< 70 y $\geq 60\%$
Moderadamente grave	< 60 y $\geq 50\%$
Grave	< 50 y $\geq 35\%$
Muy grave	$\leq 34\%$

TLC: capacidad pulmonar total; FRC: capacidad residual funcional; RV: volumen residual; LIN: límite inferior de la normalidad.

blecidos en la normativa SEPAR⁽³⁴⁾, junto con los patrones de alteración y los grados de restricción están detallados en la tabla 1.

La normativa SEPAR⁽³⁴⁾, siguiendo a Morris y cols.⁽⁴⁹⁾, también propone la estimación de “gas atrapado”, restando el volumen de gas intratorácico medido por pletismografía (TGV) de la FRC medida por dilución de helio, considerando normal un valor de < 1,10 litros, probable 1,10 - 1,19 L, ligero 1,20 a 1,34 L, moderado de 1,35-1,49 L y grave \geq de 1,5 L.

La TLC suele estar disminuida en enfermedades que alteran el llenado alveolar, como las neumopatías intersticiales, las que afectan a la musculatura respiratoria, la cifoescoliosis, y los

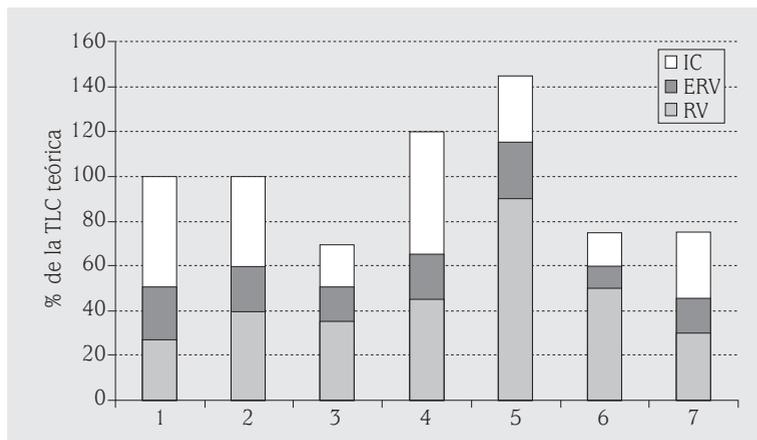


FIGURA 6. Diferentes compartimentos de volumen en algunas situaciones clínicas. 1) Adulto normal. 2) Anciano normal. 3) Fibrosis pulmonar. 4) Enfisema inicial. 5) Enfisema avanzado. 6) Afectación muscular. 7) Obesidad importante.

derrames o engrosamientos pleurales. También puede disminuir en la obesidad mórbida.

El RV se incrementa precozmente en el enfisema y aumenta también en afectación de la vía aérea periférica (broquiolitis), en la afectación neuromuscular y en situaciones de congestión pulmonar como el fallo ventricular izquierdo.

La información de los volúmenes pulmonares debe valorarse junto a la que proporciona la espirometría para orientar mejor los patrones de alteración en cada situación clínica.

En la figura 6 se ofrece un esquema de la distribución de los diferentes volúmenes pulmonares en algunas de las situaciones clínicas más comunes.

BIBLIOGRAFÍA

1. De TA, Estenne M. Functional anatomy of the respiratory muscles. *Clin Chest Med.* 1988; 9 (2): 175-93.
2. Mead J, Loring SH. Analysis of volume displacement and length changes of the diaphragm during breathing. *J Appl Physiol.* 1982; 53 (3): 750-5.
3. De TA, Kirkwood PA, Wilson TA. Respiratory action of the intercostal muscles. *Physiol Rev.* 2005; 85 (2): 717-56.
4. Wilson TA, De TA. Diagrammatic analysis of the respiratory action of the diaphragm. *J Appl Physiol.* 2010; 108 (2): 251-5.
5. Cappello M, De TA. On the respiratory function of the ribs. *J Appl Physiol.* 2002; 92 (4): 1642-6.

6. Konno K, Mead J. Measurement of the separate volume changes of rib cage and abdomen during breathing. *J Appl Physiol.* 1967; 22 (3): 407-22.
7. Konno K, Mead J. Static volume-pressure characteristics of the rib cage and abdomen. *J Appl Physiol.* 1968; 24 (4): 544-8.
8. Gibson GJ, Pride NB. Lung distensibility. The static pressure-volume curve of the lungs and its use in clinical assessment. *Br J Dis Chest.* 1976; 70 (3): 143-84.
9. Gibson GJ. Lung volumes and elasticity. *Clin Chest Med.* 2001; 22 (4): 623-35, vii.
10. Gibson GJ, Pride NB, Davis J, Schroter RC. Exponential description of the static pressure-volume curve of normal and diseased lungs. *Am Rev Respir Dis.* 1979; 120 (4): 799-811.
11. Janssens JP, Pache JC, Nicod LP. Physiological changes in respiratory function associated with ageing. *Eur Respir J* 1999; 13 (1): 197-205.
12. Milic-Emili J, Henderson JA, Dolovich MB, Trop D, Kaneko K. Regional distribution of inspired gas in the lung. *J Appl Physiol.* 1966; 21 (3): 749-59.
13. Respiratory mechanics in infants: physiologic evaluation in health and disease. American Thoracic Society/European Respiratory Society. *Am Rev Respir Dis.* 1993; 147 (2): 474-96.
14. Stocks J, Quanjer PH. Reference values for residual volume, functional residual capacity and total lung capacity. *ATS Workshop on Lung Volume Measurements. Official Statement of The European Respiratory Society.* *Eur Respir J.* 1995; 8 (3): 492-506.

15. Jones RL, Nzekwu MM. The effects of body mass index on lung volumes. *Chest*. 2006; 130 (3): 827-33.
16. Watson RA, Pride NB, Thomas EL, Fitzpatrick J, Durighel G, McCarthy J, et al. Reduction of total lung capacity in obese men: comparison of total intrathoracic and gas volumes. *J Appl Physiol*. 2010; 108 (6): 1605-12.
17. Gaultier C, Crapo R. Effects of nutrition, growth hormone disturbances, training, altitude and sleep on lung volumes. *Eur Respir J*. 1997; 10 (12): 2913-9.
18. Korotzer B, Ong S, Hansen JE. Ethnic differences in pulmonary function in healthy nonsmoking Asian-Americans and European-Americans. *Am J Respir Crit Care Med*. 2000; 161 (4 Pt 1): 1101-8.
19. Oscherwitz M, Edlavitch SA, Baker TR, Jarboe T. Differences in pulmonary functions in various racial groups. *Am J Epidemiol*. 1972; 96 (5): 319-27.
20. Michels A, Decoster K, Derde L, Vleurinck C, Van de Woestijne KP. Influence of posture on lung volumes and impedance of respiratory system in healthy smokers and nonsmokers. *J Appl Physiol*. 1991; 71 (1): 294-9.
21. Allen SM, Hunt B, Green M. Fall in vital capacity with posture. *Br J Dis Chest*. 1985; 79 (3): 267-71.
22. Ballard RD, Irvin CG, Martin RJ, Pak J, Pandey R, White DP. Influence of sleep on lung volume in asthmatic patients and normal subjects. *J Appl Physiol*. 1990; 68 (5): 2034-41.
23. Babb TG, Rodarte JR. Lung volumes during low-intensity steady-state cycling. *J Appl Physiol*. 1991; 70 (2): 934-7.
24. Biersteker MW, Biersteker PA. Vital capacity in trained and untrained healthy young adults in the Netherlands. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1985; 54 (1): 46-53.
25. Shephard RJ, Lavallee H. Effects of enhanced physical education on lung volumes of primary school children. *J Sports Med Phys Fitness*. 1996; 36 (3): 186-94.
26. Lenfant C, Sullivan K. Adaptation to high altitude. *N Engl J Med*. 1971; 284 (23): 1298-309.
27. Mead J, Milic-Emili J, Turner JM. Factors limiting depth of a maximal inspiration in human subjects. *J Appl Physiol*. 1963; 18: 295-6.
28. Leith DE, Mead J. Mechanisms determining residual volume of the lungs in normal subjects. *J Appl Physiol*. 1967; 23 (2): 221-7.
29. Agostoni E, Torri G. Diaphragm contraction as a limiting factor to maximum expiration. *J Appl Physiol*. 1962; 17: 427-8.
30. Dubois AB, Botelho SY, Bedell GN, Marshall R, Comroe JH, Jr. A rapid plethysmographic method for measuring thoracic gas volume: a comparison with a nitrogen washout method for measuring functional residual capacity in normal subjects. *J Clin Invest* 1956; 35 (3): 322-6.
31. Yernault JC, Pride N, Laszlo G. How the measurement of residual volume developed after Davy (1800). *Eur Respir J*. 2000; 16 (3): 561-4.
32. Casán P, Burgos F, Barberá JA, Giner J. Espirometría. [Procedimientos de evaluación de la función pulmonar]. Manual SEPAR de Procedimientos. Luzán S.A.; 2002. p. 4-15.
33. Miller MR, Hankinson J, Brusasco V, Burgos F, Casaburi R, Coates A, et al. Standardisation of spirometry. *Eur Respir J*. 2005; 26 (2): 319-38.
34. Comte L, Macian V, Blanco M, Rodríguez M. Volúmenes pulmonares. [Valoración de la Función Pulmonar I]. Manual SEPAR de Procedimientos. Luzán S.A.; 2002. p. 37-66.
35. Wanger J, Clausen JL, Coates A, Pedersen OF, Brusasco V, Burgos F, et al. Standardisation of the measurement of lung volumes. *Eur Respir J*. 2005; 26 (3): 511-22.
36. Miller MR, Crapo R, Hankinson J, Brusasco V, Burgos F, Casaburi R, et al. General considerations for lung function testing. *Eur Respir J*. 2005; 26 (1): 153-61.
37. Torres Martín A, Burgos F, Casán P, Gravalos J, Martínez Moratalla J, Pi-Sunyer T. Control microbiológico en los equipos de función y terapia respiratoria. [Normativas y procedimientos. Normativa nº 18]. 2011.
38. Newth CJ, Enright P, Johnson RL. Multiple-breath nitrogen washout techniques: including measurements with patients on ventilators. *Eur Respir J*. 1997; 10 (9): 2174-85.
39. Clausen J. Measurement of absolute lung volumes by imaging techniques. *Eur Respir J*. 1997; 10 (10): 2427-31.
40. Andersson LG, Ringqvist I, Walker A. Total lung capacity measured by body plethysmography and by the helium dilution method. A comparative study in different patient groups. *Clin Physiol*. 1988; 8 (2): 113-9.
41. García-Río F, Pino-García JM, Serrano S, Racionero MA, Terreros-Caro JG, Álvarez-Sala R, et al. Comparison of helium dilution and plethys-

- mographic lung volumes in pregnant women. *Eur Respir J*. 1997; 10 (10): 2371-5.
42. Kilburn KH, Warshaw RH, Thornton JC, Thornton K, Miller A. Predictive equations for total lung capacity and residual volume calculated from radiographs in a random sample of the Michigan population. *Thorax*. 1992; 47 (7): 519-23.
 43. 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.
 44. Quanjer PH, Tammeling GJ, Cotes JE, Pedersen OF, Peslin R, Yernault JC. Lung volumes and forced ventilatory flows. Report Working Party Standardization of Lung Function Tests, European Community for Steel and Coal. Official Statement of the European Respiratory Society. *Eur Respir J Suppl*. 1993; 16: 5-40.
 45. Roca J, Burgos F, Barberá JA, Sunyer J, Rodríguez-Roisin R, Castellsague J, et al. Prediction equations for plethysmographic lung volumes. *Respir Med*. 1998; 92 (3): 454-60.
 46. Cordero PJ, Morales P, Benlloch E, Miravet L, Cebrian J. Static lung volumes: reference values from a Latin population of Spanish descent. *Respiration*. 1999; 66 (3): 242-50.
 47. García-Río F, Pino JM, Dorgham A, Alonso A, Villamor J. Spirometric reference equations for European females and males aged 65-85 yrs. *Eur Respir J*. 2004; 24 (3): 397-405.
 48. García-Río F, Dorgham A, Pino JM, Villasante C, García-Quero C, Álvarez-Sala R. Lung volume reference values for women and men 65 to 85 years of age. *Am J Respir Crit Care Med*. 2009; 180 (11): 1083-91.
 49. Morris AH, Kanner RE, Crapo R, Gardner RM. Lung volumes. En: *Clinical pulmonary function testing: a manual of uniform laboratory procedures*. Utha: Intermountain Thoracic Society; 1984. p. 63-76.