

# FISIOLOGÍA RESPIRATORIA

## MECÁNICA DE LA RESPIRACIÓN

### MECHANICS OF BREATHING

Dr. Jorge Mackenney Poblete

Pediatra Broncopulmonar. Profesor Asociado de Pediatría Universidad de Chile.

Para que exista movimiento de aire debe existir un gradiente de presión entre el ambiente y los alveolos. En condiciones fisiológicas y reposo respiratorio (fin de la espiración), el sistema se encuentra en equilibrio y se considera a presión 0, cuando la bomba muscular y caja torácica se expanden en forma activa, la presión intratorácica se hace negativa y el aire entra generando un flujo de gases hasta los alveolos (**ley de Boyle**). Con el inicio de la espiración, la presión antes negativa, ahora será positiva debido a la retracción de los tejidos elásticos y el relajamiento muscular generando una presión sobre la atmosférica y con ello la salida de aire en forma pasiva.

La expansión alveolar se debe a la presión de distensión ejercida por la **presión transmural** que se calcula restando la presión externa (pleural) de la presión interna (alveolar). La presión del espacio pleural (virtual) se debe a la interacción mecánica entre la caja torácica que tiende a expandirse y la retracción elástica pulmonar que tiende a retraerse, en reposo respiratorio o sea a CRF, esta es ligeramente negativa (-3 a -5 cm H<sub>2</sub>O). Al final de la espiración la presión transmural será de 5 cm H<sub>2</sub>O, cuando se inicia la inspiración la expansión del torax gene-

#### RESUMEN

El trabajo respiratorio se ejerce en una estructura cerrada donde se encuentran los pulmones, estos son sometidos a cambios de presiones determinados por la musculatura pulmonar en las diferentes fases del ciclo respiratorio, lo que generará gradientes y permite la entrada y salida de aire. Se suman a ello el calibre de las vías aéreas, el tipo de flujo, las características de las vías aéreas y del surfactante pulmonar, que determinan un menor o mayor trabajo respiratorio según la condición fisiológica.

**Palabras claves:** Volúmenes pulmonares, presión, distensibilidad, histéresis, retracción elástica, resistencia, tensión superficial.

#### ABSTRACT

The work of breathing is exerted in a closed structure where the lungs are located. These are subjected to pressure changes determined by the pulmonary musculature in the different phases of the respiratory cycle, which will generate gradients and allow the entry and exit of air. In addition to the aforesaid, airway calibre, type of flow, airway characteristics and pulmonary surfactant determine less or more work of breathing depending on the physiological condition.

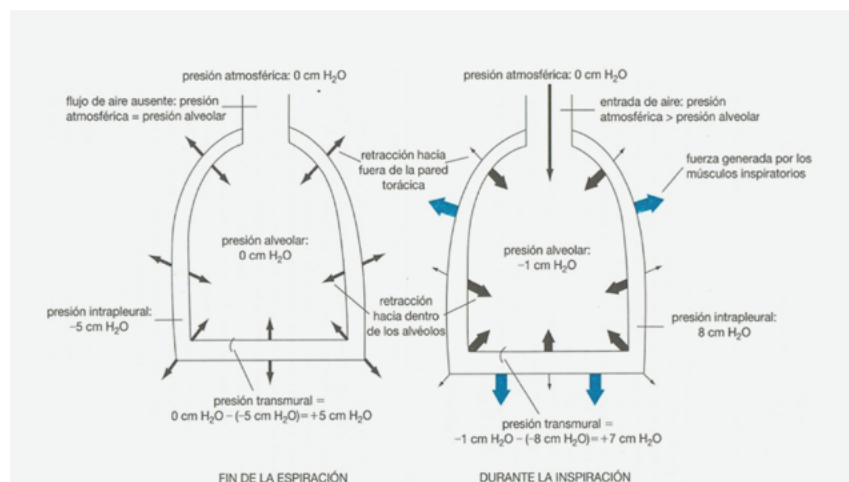
**Keywords:** Lung volumes, pressure, distensibility, hysteresis, elastic recoil, resistance, surface tension.

ra una presión intrapleural más negativa y con ello una presión alveolar negativa que hace que exista flujo hacia los alveolos que se distienden pasivamente. Al final de la inspiración la presión intralveolar está por sobre la atmosférica y por lo tanto la gradiente es la contraria y ahora los gases se moverán hacia afuera (Figura 1).

Este juego de presiones y las caracterís-

ticas del tejido pulmonar permiten que estos cambios se transmitan fácilmente a través de las paredes a los alveolos que se encuentran más alejados de la pared torácica, fenómeno denominado **interdependencia de las unidades alveolares**. Todo esto determina que los cambios de presiones generen cambios de volumen y por tanto en vías aéreas abiertas, flujo de gases en un ciclo respiratorio normal. Sin embargo hay otras características de la mecánica respiratoria que deben ser explicadas para entender todo el fenómeno de una respiración normal.

Lo primero es entender que el sistema no se comporta como un globo único, sino que la interacción de las estructuras torácicas y pulmonares determinan que los cambios de volumen pulmonar secundarios a los cambios de presión transpulmonar serán diferentes dependiendo de la fase del ciclo respiratorio, del volumen y de las características del tejido pulmonar. Este fenómeno denominado **distensibilidad o compliance pulmonar** da cuenta de esto y se puede observar su descripción en la Figura 2A, la que muestra diferencias notables en la fase inspiratoria y la espiratoria en relación a los volúmenes alcanzados. Así, du-



**Figura 1.** Determinación esquemática de las presiones que se presentan durante el ciclo respiratorio, a la izquierda en reposo respiratorio y equilibrio a nivel de CRF. A la derecha durante una inspiración se observan las presiones generadas por la expansión del tórax gracias al uso de la musculatura, que determinan la gradiente y permiten la entrada de aire a la vía aérea. Modificado de Levizky (4)

#### Autor para correspondencia:

Dr. Jorge Mackenney Poblete  
jmackenney@uchile.cl

rante la inspiración el tejido se distiende con facilidad al inicio (volúmenes pulmonares bajos) y con cierta dificultad al final (volúmenes pulmonares altos), debido a la resistencia que generan los propios tejidos y volúmenes alcanzados. Las curvas en inspiración y espiración son diferentes, debido a que en inspiración, los cambios de volumen por unidad de presión son menores porque se requiere una presión transmural activa y vencer la resistencia del tejido y las vías aéreas. Este fenómeno se le llama **histeresis** (Figura 2B) y podría ser explicado por los cambios que sufre la tensión superficial determinada por el surfactante, junto con el posible reclutamiento o desreclutamiento de unidades alveolares.

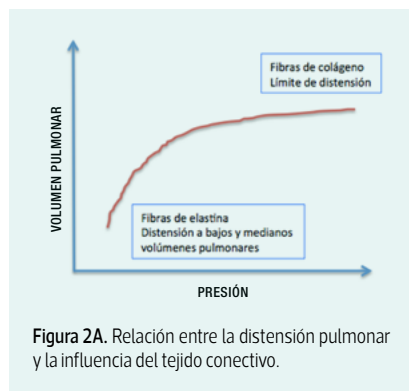


Figura 2A. Relación entre la distensión pulmonar y la influencia del tejido conectivo.

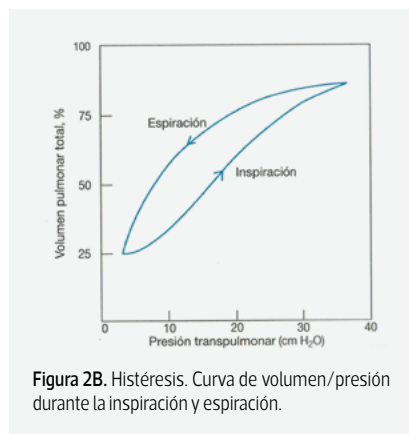


Figura 2B. Histeresis. Curva de volumen/presión durante la inspiración y espiración.

El análisis de la distensibilidad del aparato respiratorio total es la suma de la distensibilidad del tejido pulmonar y el de la pared torácica, los cuales se suman como recíprocos al formar físicamente una serie. En muchos casos uno influye en el otro, como por ejemplo en un paciente obeso o con cifoescoliosis, la distensibilidad de la caja torácica estará más disminuida que la del pulmón en un comienzo, pero con el tiempo ese tejido no logrará expandirse tan fácilmente. Y en el caso de una alteración del tejido pulmonar como una fibrosis, la distensibilidad pulmonar estará muy disminuida

y requerirá mayor trabajo respiratorio (presión transmural) para lograr una ventilación alveolar efectiva. La distensibilidad de los pulmones se puede medir con un espirómetro y una medición de la presión esofágica. Se mide durante la inspiración o espiración, pero con detención del flujo, se obtienen las curvas de distensibilidad estática. La distensibilidad del tórax se obtiene al realizar las mediciones de la distensibilidad del sistema total y se resta la calculada en forma estática.

Otra característica determinante de la mecánica pulmonar es la **retracción elástica del pulmón**, donde las características propias del tejido, como la elastina, colágeno, y otros se suman a las de la tensión superficial, fenómeno físico en toda interfaz aire/líquido determinado por la cohesión de las moléculas del líquido, que en la superficie se oponen generando una menor superficie y con ello menor volumen. Este fenómeno es contrarrestado por el tensioactivo pulmonar del pulmón maduro, que disminuye la tensión superficial significativamente y que en conjunto a la **interdependencia estructural alveolar** determinan un volumen alveolar más estable, evitando el colapso y vaciamiento de los alveolos más pequeños.

La **Ley de Laplace** permite establecer la presión al interior del alveolo según la siguiente fórmula:

$$\text{Presión (dinas/cm}^2\text{)} = 2 \cdot \text{tensión (dinas/cm)} / \text{radio (cm)}$$

En ella observamos que a menor radio alveolar (menor volumen), mayor será la presión y por ende el más pequeño se vaciará en el de mayor radio, sin embargo gracias a que la tensión superficial no es constante debido al reordenamiento molecular del tensioactivo alveolar en las superficies, esto no se produce.

La interacción entre la caja torácica y el pulmón es muy dinámica, siendo determinante para generar volúmenes pulmonares que permitan un menor trabajo respiratorio. En el reposo respiratorio el punto de equilibrio entre las fuerzas de retracción elásticas del pulmón que lo tienden a colapsar, se contrarrestan con las fuerzas de retracción de la caja torácica que tienden a expandirse, ese punto de equilibrio llamado **capacidad residual funcional (CRF)**, es cuando llegamos al final de la espiración normal, manteniendo un volumen pulmonar fundamental para facilitar la siguiente respiración, sin él o bien cuando está muy disminuido, el trabajo respiratorio será significativo y llevará a la fatiga con la consiguiente hipoventilación alveolar. Esto ocurre con frecuencia en niños, especial en menores de 2 años, pues la CRF tiende a estar más cerca del **volumen de cierre**,

debido a la posición acostado, abdomen abultado, patología de vías aéreas, etc. La sola posición supino reduce en cerca de un 30% la CRF (Figura 3). Esto se reduce aún más durante el sueño, especialmente durante el sueño REM.

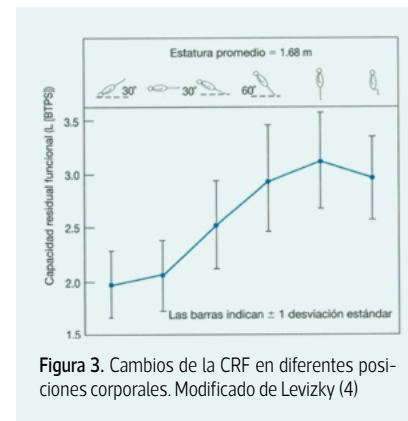


Figura 3. Cambios de la CRF en diferentes posiciones corporales. Modificado de Levitzky (4)

Para asegurar un flujo de aire no solo basta una adecuada gradiente de presiones, se requiere conocer el otro fenómeno fisiológico que se opone al flujo de aire, denominada **resistencia (R) de las vías aéreas**, lo que es muy relevante, en especial en niños pequeños debido en parte al menor diámetro de sus vías aéreas. La R del tejido pulmonar se debe a la fricción de los tejidos entre sí cuando el pulmón se expande y contribuye a cerca del 20% de la R pulmonar total, siendo la R de las vías aéreas el componente principal (80%) de la R total del sistema. Veremos ahora los determinantes de la R de las vías respiratorias.

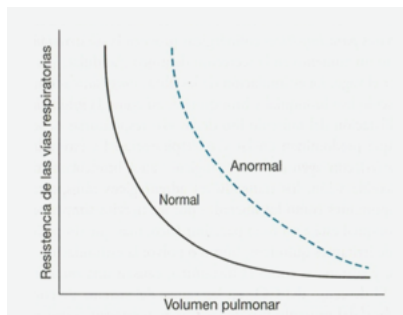
$R = \text{diferencia de presión (cmH}_2\text{O)} / \text{flujo (L/s)}$ , lo que determina que la R es significativa sólo cuando hay flujo de aire. Las vías aéreas pequeñas se disponen en paralelo y sus R se suman como recíprocos ( $1/R$ ) y por lo tanto, la resistencia al flujo determinada por miles de pequeñas vías aéreas es sumamente baja. Una parte significativa de la R al flujo aéreo está en las vías aéreas superiores supraglóticas, cercanas al 25 a 40% de la R total. Esto es muy relevante en los casos de recién nacidos (RN) y lactantes menores, donde la sola obstrucción de las fosas nasales o bien de la laringe determinan cuadros obstructivos muy sintomáticos. Si a esto sumamos que en los menores de 2 años el calibre pequeño de las vías aéreas (< 2mm) determina hasta el 50% de la R total, podremos entender mejor la fisiopatología de los cuadros obstructivos intratorácicos tan prevalentes. En un adulto las vías aéreas < 2 mm solo determinan el 20% de la R total y se convierten en el área silente del pulmón y se harán sintomáticos cuando su afección sea muy significativa (ej. EPOC). El resto de la R en circunstancias nor-

males del adulto (la más significativa), se encuentra en las vías aéreas de mediano calibre.

El diámetro de la vía aérea es el mayor determinante de la R, pero también importan la viscosidad, la longitud y el tipo de flujo que se genera. Esto está muy bien explicado por la **ley de Poiseuille** (en física para tubos rígidos), donde la R es directamente proporcional a la longitud del tubo y la viscosidad, e inversamente proporcional al radio de la 4ª potencia ( $R = 8nl / nr^4$ ), así la disminución del radio en un 50% determinará un aumento en la R de al menos 16 veces (lo que explica en parte la alta incidencia de laringitis obstructivas en el menor de 5 años, hasta que la laringe adquiere un diámetro más significativo).

El **tipo de flujo** presente en una vía aérea está influenciado por la tasa de flujo (V), el radio de la vía aérea (r), la densidad del gas (p) y la viscosidad del gas (η). El **número de Reynold** =  $2Vrp / \eta$  es un cálculo de las variables anteriores que se utiliza para determinar si el flujo será turbulento o laminar. Un número de Reynold superior a 2300 generalmente indica que el flujo tendrá un componente turbulento. El tipo de flujo también es relevante para determinar la R, sin embargo, la caracterización de ello es muy difícil de imaginar en las vías aéreas ramificadas, cada vez de menor calibre, distensibles y compresibles dependiendo la fase del ciclo respiratorio y del volumen pulmonar al cual se analicen. El flujo laminar, el turbulento y de transición conviven en las vías aéreas, siendo más laminar en las vías aéreas de menor calibre y turbulento cuando hay mayor flujo, en especial en las vías de mayor diámetro.

Por último, analizaremos cómo se relacionan **la resistencia y los volúmenes pulmonares**. Recordemos que las vías aéreas de conducción (hasta la división 16) representan alrededor de una 4ª parte del área de sección total de las vías aéreas, éstas en especial en los niños pequeños, tienen menos soporte cartilaginoso, mayor grosor de la pared y más glándulas y células secretoras que niños mayores y adultos, determinando mayor secreción bronquial. Estos factores, sumado a un menor diámetro y mayor colapsabilidad, determinan mayor R, en especial a volúmenes pulmonares más pequeños. A volúmenes pulmonares altos, debido al mayor diámetro de las vías aéreas, la R es menor. Debemos sumar un segundo aspecto determinado por la mayor tracción de las vías aéreas de pequeño calibre ejercidas por el aumento del volumen alveolar en inspiraciones profundas, generando tracción elástica de sus paredes cercanas a ductos respiratorios. (Figura 4).



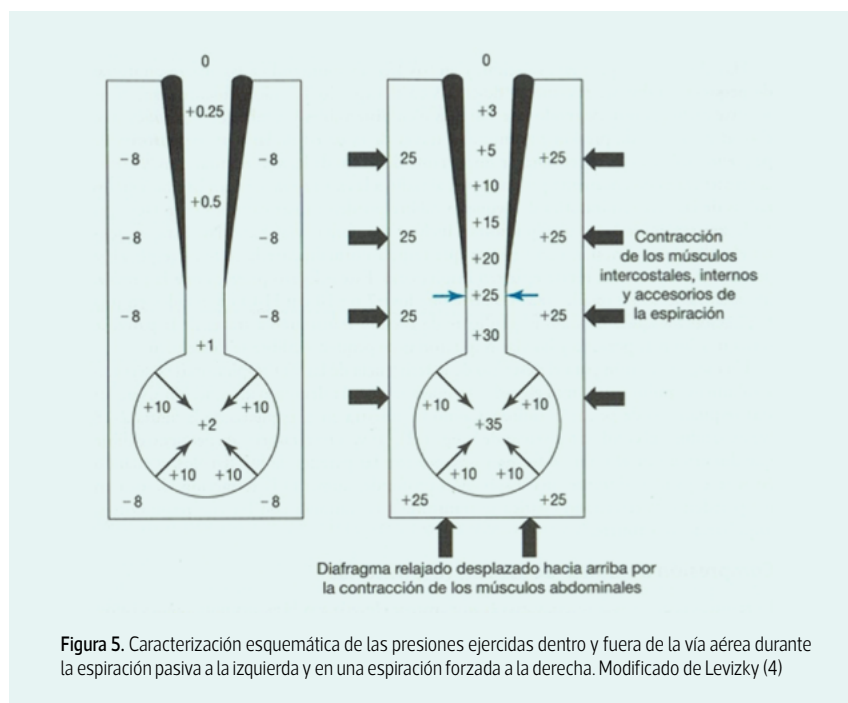
**Figura 4.** Relación entre el volumen pulmonar y la resistencia de las vías aéreas en condiciones normales como patológicas.

La R de las vías aéreas es muy elevada a volúmenes pulmonares bajos, y para generar flujo se requiere un esfuerzo espiratorio contrayendo la musculatura espiratoria en forma activa, este esfuerzo determina una presión intrapleurales ahora positiva que generará un flujo significativo (flujo dependiente de esfuerzo) y luego el flujo dependerá solo de la retracción elástica del pulmón (flujos independientes de esfuerzo).

En condiciones normales la fase espiratoria es pasiva, y la gradiente que genera el flujo está determinada por la retracción elástica por sobre la presión pleural negativa. Esta presión de retracción elástica se va perdiendo a medida que el pulmón se desinfla y se mantiene positiva hasta las vías aéreas centrales en personas normales. Sin embargo, en niños pequeños o

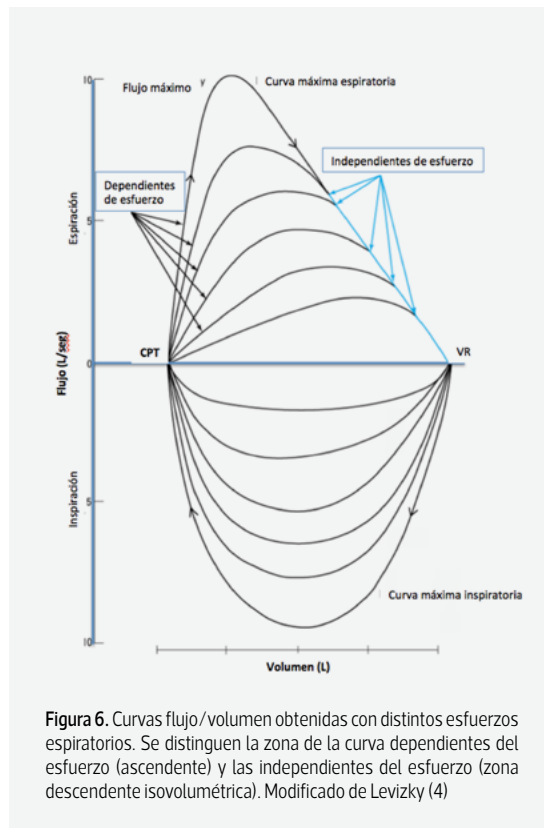
prematuros, esta presión de retracción elástica es menor y por lo tanto la gradiente es menor y puede que se haga negativa en las vías aéreas más distales, determinando el fenómeno de compresión dinámica de las vías aéreas y punto de igual presión, que mientras esté más distal en vías aéreas más colapsables, determinará atrapamiento aéreo. Fenómeno muy frecuente en las enfermedades obstructivas.

En la figura 5 podemos ver cómo se comportan en forma esquemática las diferentes presiones durante la espiración pasiva y forzada. Nótese que, en ambas, la presión de retracción alveolar es la misma y que durante una espiración forzada la presión pleural más negativa puede determinar una compresión dinámica de las vías aéreas dependiendo de la pérdida de presión alveolar, la que es dependiente en gran parte de la retracción elástica y de la resistencia al flujo. Este fenómeno puede explicarse en parte por la **hipótesis del punto de igual presión**, que ocurre en alguna parte de la vía aérea durante una espiración forzada, cuando la presión dentro de la vía aérea es igual a la exterior (presión transmural 0), por sobre ese punto la presión exterior sobrepasará la del interior y la vía aérea podría colapsar si el soporte cartilaginoso y tracción interseptal alveolar no son suficientes. Cuando el trabajo respiratorio aumenta, y nos encontramos a menores volúmenes pulmonares con menor retracción elástica y mayor resistencia (broncoconstricción, edema de pared, secreciones), la compresión dinámica aumenta y este punto



**Figura 5.** Caracterización esquemática de las presiones ejercidas dentro y fuera de la vía aérea durante la espiración pasiva a la izquierda y en una espiración forzada a la derecha. Modificado de Levizky (4)

se moverá hacia la vía aérea más distal y por lo tanto podría colapsar, determinado atrapamiento aéreo y falta de flujo, lo que podría equipararse al **volumen de cierre**, que ocurre normalmente a volúmenes pulmonares muy bajos. La resistencia de las VA ( $R = \Delta P / V$ ) requiere conocer los cambios de presión alveolar y los flujos, lo que es complejo y difícil de determinar en la práctica. Por ello la valoración durante las maniobras espirométricas permite acercarse con mayor simplicidad. En una maniobra de capacidad vital forzada, podemos obtener 2 parámetros muy significativos que demuestran la obstrucción de las vías aéreas, el primero el VEF1 y mejor aún es la relación del VEF1/CVF que en sujetos normales es mayor al 80%; y el segundo es la pendiente entre los puntos que marcan el 25% y 75% de la CVF, llamado FEF 25-75% y determina el flujo de la vía aérea no dependiente del esfuerzo, pues a volúmenes pulmonares bajos, el flujo se hace independiente del esfuerzo debido a una mayor compresión dinámica con presiones pleurales más positivas. Esto también se puede ver representado en las curvas flujo/volumen. (Figura 6)



**Figura 6.** Curvas flujo/volumen obtenidas con distintos esfuerzos espiratorios. Se distinguen la zona de la curva dependientes del esfuerzo (ascendente) y las independientes del esfuerzo (zona descendente isovolumétrica). Modificado de Levitzky (4)

## REFERENCIAS

1. Lynn M. Taussig and Louis I. Landau, Pediatric Respiratory Medicine. Second Edition 2008.
2. Grinnan DC, Truwit JD. Revisión clínica: mecánica respiratoria en ventilación espontánea y asistida. Crit Care. 2005; 9 (5): 474-484. doi:10.1186 / cc3516
3. Respiratory mechanics in infants: physiologic evaluation in health and disease. American Thoracic Society/ European Respiratory Society. Am Rev Respir Dis. 1993 Feb;147(2):474-96. doi: 10.1164/ajrccm/147.2.474. PMID: 8430975.
4. Michael G. Levitzky, PhD Pulmonary Physiology. Book 7<sup>a</sup> edition 2008.
5. West. Fisiología Respiratoria. 10.<sup>a</sup> ed. (Wolters Kluwer, 2016)

## CONCLUSIONES

A modo de colorario, el trabajo respiratorio es proporcional al cambio de presión por el cambio de volumen. El cambio de volumen es el aire desplazado, y el cambio de presión es la presión necesaria para vencer el trabajo elástico y de resistencia durante la respiración.