

# FISIOLOGÍA RESPIRATORIA

## VENTILACIÓN: CÓMO LLEGA EL AIRE A LOS ALVEOLOS

### VENTILATION: HOW AIR GETS INTO THE ALVEOLI

Dr. Rodrigo Bozzo Henríquez

Pediatra Broncopulmonar. Hospital de niños Dr. Roberto del Río. Clínica INDISA. Profesor Agregado de Pediatría Universidad de Chile.

La función principal del aparato respiratorio es permitir el intercambio de gases entre el aparato circulatorio y el medio ambiente, lo cual se produce entre el gas alveolar y la sangre contenida en los capilares pulmonares. El proceso antes descrito se denomina ventilación alveolar (VA).

Como conceptos generales, la ventilación total corresponde a la cantidad de aire que se ha movilizado al pulmón (y de forma implícita desde el pulmón) por unidad de tiempo y se puede expresar a través de la siguiente fórmula.

$$\dot{V}_T = VC \times FR$$

Donde  $V_T$  es la ventilación total (por minuto), VC es volumen corriente y FR es la frecuencia respiratoria.

Para comprender la fisiología de la ventilación alveolar es necesario estar familiarizado con un concepto clave para quienes nos dedicamos a la neumología: Los volúmenes pulmonares. Corresponden a la cantidad de aire que se moviliza durante la respiración (medibles a través de una "campana" en una maniobra espirométrica) y el volumen que queda "atrapado" dentro de los pulmones sin lograr eliminarse completamente en una espiración forzada (volumen residual) y que por lo tanto no se logra medir en una maniobra espirométrica convencional. Además de los volúmenes existen las capacidades, que corresponden a la suma de dos o más volúmenes. Los volúmenes pulmonares son cuatro, a conocer y se grafican en la figura 1:

- **Volumen corriente (VC):** Es la cantidad de aire que se moviliza en cada ciclo respiratorio, en un sujeto respirando tranquilamente. En un adulto corresponde aproximadamente a 500 ml.
- **Volumen de reserva inspiratoria (VRI):** Es el volumen adicional al VC que se puede movilizar en una inspiración máxima, está determinado por la fuerza de la musculatura respiratoria y por las propiedades viscoelásticas de la caja torácica y el pulmón.
- **Volumen de reserva espiratoria (VRE):** Es el volumen máximo que se puede eli-

#### RESUMEN

La principal función del aparato respiratorio es permitir el intercambio gaseoso, el cual se produce en las unidades alveolares. Para definir y conocer la ventilación alveolar, es necesario estar familiarizado con los volúmenes y capacidades pulmonares, además de conocer los principios fisiológicos que nos permiten medirlos y/o estimarlos. El objetivo de este artículo es revisar estos conceptos, para aumentar el entendimiento de la fisiología del aparato respiratorio.

**Palabras claves:** Volúmenes pulmonares, ventilación alveolar, ventilación pulmonar, ley de Bohr, fisiología respiratoria.

#### ABSTRACT

The main function of the respiratory system is to allow gas exchange, which occurs in the alveolar units. To define and know alveolar ventilation, it is necessary to be familiarized with lung volumes and capacities, in addition to understand the physiological principles that allow us measure and / or estimate them. The objective of this article is to review these concepts, to increase the understanding of the physiology of the respiratory system.

**Keywords:** Pulmonary volumes, alveolar ventilation, pulmonary ventilation, Bohr's law, respiratory physiology.

minar desde el pulmón al activar al máximo la musculatura espiratoria (espiración forzada) luego de una espiración tranquila (a volumen corriente).

- **Volumen residual (VR):** Corresponde a la cantidad de aire que permanece "atrapado" en el pulmón después de una espiración forzada máxima.

Las capacidades del pulmón (suma de volúmenes) también son cuatro:

**Capacidad vital:** VRI + VC + VRE.

**Capacidad inspiratoria:** VC + VRI.

**Capacidad residual funcional:** VRE + VR.

**Capacidad pulmonar total:** VRI + VC + VRE + VR.

#### VENTILACIÓN

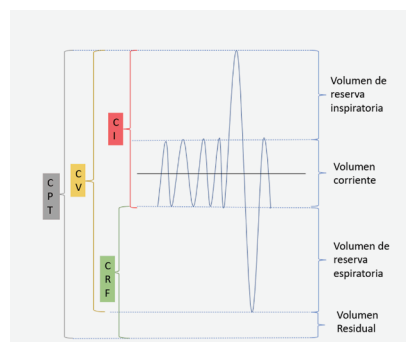
Como mencionamos al comienzo de este artículo, la ventilación total está dada por el producto entre el volumen corriente (VC) y la frecuencia respiratoria (FR), de este modo, si un sujeto que tiene un VC de 500 ml respira 15 veces por minuto, su ventilación total será de 7500 ml/min.

La ventilación alveolar, corresponde al volumen de aire que efectivamente llega a las unidades de intercambio gaseoso (alveolos), es decir, se debe descontar el aire que queda retenido en el espacio muerto. O sea, en el ejemplo anterior, si consideramos un espacio muerto de 150 ml, tendríamos que considerar que del volumen corriente de 500 ml, sólo 350 ml llegan a las unidades alveolares, por lo que la ventilación alveolar sería de 5250 ml, correspondiendo los otros 2250 ml a ventilación de espacio muerto.

Otra forma de expresar lo anterior es:

$$\dot{V}_T = \dot{V}_A + \dot{V}_D$$

Donde  $V_T$  corresponde a ventilación total,  $V_A$  a ventilación alveolar y  $V_D$  a ventilación de espacio muerto.



**Figura 1.** Volúmenes y capacidades pulmonares. CPT: Capacidad pulmonar total, CV: Capacidad vital, CI: Capacidad inspiratoria, CRF: Capacidad residual funcional.

#### Autor para correspondencia:

Dr. Rodrigo Bozzo Henríquez  
rjbozzoh@gmail.com

El espacio muerto corresponde a la porción del tracto respiratorio donde no se efectúa intercambio gaseoso. Existen dos "tipos" de espacio muerto:

**Espacio muerto anatómico:** Corresponde a la vía aérea de conducción, que no cuenta con unidades alveolares, es decir, hasta los bronquiólos terminales. Durante la inspiración forzada puede aumentar discretamente por la tracción radial ejercida sobre los bronquiólos por el parénquima pulmonar.

**Espacio muerto fisiológico:** Corresponde a las áreas del pulmón que cuentan con ventilación, pero no cuentan con perfusión, por lo que no participan del intercambio gaseoso. En otras palabras, es la suma entre el espacio muerto anatómico y el espacio muerto alveolar.

En individuos sanos, el espacio muerto anatómico y el espacio muerto fisiológico son prácticamente iguales, sin embargo, en condiciones patológicas, el segundo puede aumentar considerablemente dependiendo de las diferencias entre el flujo sanguíneo y la ventilación en los diferentes territorios pulmonares. Estas alteraciones exceden los objetivos de la presente revisión.

Como vimos anteriormente, la ventilación total es relativamente fácil de determinar, midiendo el volumen corriente con una válvula espiratoria, sin embargo para cuantificar la ventilación alveolar, necesitamos conocer la cuantía del espacio muerto, lo cual no es posible mediante maniobras espirométricas convencionales. De esta forma surgen dos métodos para medir el espacio muerto: El método de Fowler, que permite medir el espacio muerto anatómico y el método de Bohr que permite medir el espacio muerto fisiológico ya definidos anteriormente.

**MÉTODO DE FOWLER**

Se realiza una inspiración única de oxígeno al 100% a través de una válvula unidireccional, luego, posterior a una pausa inspiratoria de 1 segundo, se utiliza un medidor de nitrógeno para medir la concentración del nitrógeno espirado. La concentración de nitrógeno espirado y el volumen espirado se miden de forma simultánea. Así, en la primera parte de la espiración, luego de la pausa de 1 segundo, la concentración de nitrógeno será de 0% (es oxígeno sin diluir que viene del espacio muerto anatómico), luego su concentración va aumentando progresivamente en la medida que se produce una mezcla entre el gas del espacio muerto y el gas alveolar, debido a la transición entre bronquiólos terminales y bronquiólos respiratorios, llegando finalmente a una concentración "fija",

llamada meseta alveolar, cuando el aire viene exclusivamente de los alveolos.

El volumen del espacio muerto anatómico es el volumen espirado desde el inicio de la espiración hasta el punto medio de la fase de transición. (Figura 2).

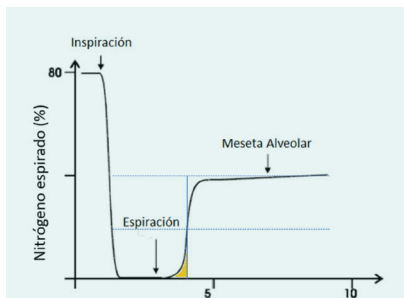


Figura 2. Determinación del espacio muerto a través del método de Fowler. Determinación del espacio muerto a través del método de Fowler.

**MÉTODO DE BOHR**

Se basa en la ecuación de Bohr, la cual permite determinar la suma entre el espacio muerto anatómico y el espacio muerto alveolar.

Según ésta, cualquier volumen medible de CO2 presente en el gas espirado, debe proceder de los alveolos ventilados y perfundidos (en el aire inspirado la cantidad de CO2 es insignificante).

De esta manera tenemos que:

$$F_{E_{CO2}} \times V_T = F_{I_{CO2}} \times V_{DCO2} + F_{ACO2} \times V_A$$

Donde:

$F_{E_{CO2}}$  = Fracción espirada mixta de CO2.

$F_{I_{CO2}}$  = Fracción inspirada de CO2.

$F_{ACO2}$  = Fracción alveolar de CO2.

$V_T$  = Volumen total.

$V_{DCO2}$  = Volumen del espacio muerto.

$V_A$  = Volumen alveolar.

Dijimos que la fracción inspirada de CO2 tiende a cero, por lo que la ecuación podría expresarse así:

$$F_{E_{CO2}} \times V_T = F_{ACO2} \times V_A$$

Reemplazando el volumen alveolar por sus componentes quedaría...

$$F_{E_{CO2}} \times V_T = F_{ACO2} (V_T - V_{DCO2})$$

O sea...

$$F_{E_{CO2}} \times V_T = F_{ACO2} \times V_T - F_{ACO2} \times V_{DCO2}$$

Reordenando la ecuación:

$$F_{ACO2} \times V_{DCO2} = F_{ACO2} \times V_T - F_{E_{CO2}} \times V_T$$

Ahora factorizamos por  $V_T$ :

$$F_{ACO2} \times V_{DCO2} = V_T (F_{ACO2} - F_{E_{CO2}})$$

Reordenamos nuevamente:

$$\frac{V_{DCO2}}{V_T} = \frac{(F_{ACO2} - F_{E_{CO2}})}{F_{ACO2}}$$

Considerando que

$$F_{CO2} = \frac{P_{CO2}}{P_{total}}$$

Reemplazamos en la ecuación:

$$\frac{V_{DCO2}}{V_T} = \frac{\left(\frac{P_{ACO2}}{P_{total}} - \frac{P_{E_{CO2}}}{P_{total}}\right)}{\frac{P_{AO2}}{P_{total}}}$$

Factorizamos nuevamente:

$$\frac{V_{DCO2}}{V_T} = \frac{P_{total} \times (P_{ACO2} - P_{E_{CO2}})}{P_{total} \times P_{ACO2}}$$

Simplificamos la ecuación, obteniendo la ecuación de Bohr:

$$\frac{V_{DCO2}}{V_T} = \frac{P_{ACO2} - P_{E_{CO2}}}{P_{ACO2}}$$

Debemos considerar que el CO2 es un gas que difunde muy rápidamente por la barrera alveolo-capilar, alcanzándose de forma rápida concentraciones similares de CO2 a ambos lados de dicha barrera, por lo que en la ecuación de Bohr podemos reemplazar la presión alveolar de CO2 por presión arterial de CO2, lo que se expresaría de la siguiente forma:

$$\frac{V_{DCO2}}{V_T} = \frac{P_{ACO2} - P_{E_{CO2}}}{P_{ACO2}}$$

Despejándose el volumen del espacio muerto (fisiológico) en función del volumen total (medible a través de una espirometría), de la presión arterial de CO2 (obtenible del análisis de gases arteriales) y de la presión espiratoria mixta de CO2 (medible con un análisis de gas espirado), podríamos expresar la misma ecuación de la siguiente manera:

$$V_{DCO2} = V_T \times \frac{P_{ACO2} - P_{E_{CO2}}}{P_{ACO2}}$$

En la mayoría de los pacientes, la presión parcial de CO2 medida al final de una espiración (ETCO2: "End tidal CO2") se corresponde con el CO2 alveolar y por su alta difusibilidad, con el capilar (equivalente al arterial), por lo que

se podría utilizar esta medición en lugar de la PaCO<sub>2</sub>. No obstante lo anterior, en pacientes que tienen un aumento patológico del espacio muerto alveolar, el ETCO<sub>2</sub> proviene de forma combinada del gas presente en los alveolos bien ventilados y perfundidos y los alveolos con alteraciones importantes de la relación ventilación/perfusión, ya sea por no estar perfundidos (hemorragias, trombos, disfunción miocárdica) o por estar sobredistendidos por una presión ventilatoria supra-fisiológica (ventilación a presión positiva, atrapamiento aéreo). Dado que la difusión de CO<sub>2</sub> entre los alveolos que sí están bien perfundidos está conservada, el equilibrio entre éstos y la PCO<sub>2</sub> arterial (PaCO<sub>2</sub>) se mantiene y tiende a ser superior al gas mezclado medible a través de la ETCO<sub>2</sub>. Cuando se produce esta diferencia entre la PaCO<sub>2</sub> y la ETCO<sub>2</sub>, es mandatorio el uso de la PaCO<sub>2</sub> en la ecuación de Bohr.

Ahora que conocemos la ventilación alveolar de un individuo, podemos calcular los niveles de oxígeno y dióxido de carbono del gas alveolar, los que dependen además del consumo de oxígeno y la producción de CO<sub>2</sub> del organismo. Según la ley de Dalton, "en una mezcla de gases, la presión parcial ejercida por cada uno de sus gases es independiente de las presiones de los demás gases de la mezcla", así, la presión parcial de un gas es igual a su concentración fraccional multiplicada por la presión total de todos los gases de la mezcla.

$$P_{gas1} = \% \text{ total del gas} \times P_{tot}$$

Sabemos que la presión atmosférica a nivel del mar es de 760 mmHg (1 ATM).

Así a nivel del mar la presión de oxígeno sería igual a su concentración ambiental (0,21) multiplicada por la presión atmosférica (760 mmHg), o sea 159 mmHg. Al pasar por la vía aérea, el aire ambiental se calienta y humidifica, por lo que se expande, agregándose una presión estándar de 47 mmHg (correspondiente a la presión parcial del vapor de agua a temperatura corporal). De este modo, la presión parcial de oxígeno inspirado es igual a la concentración fraccional de oxígeno inspirado (FiO<sub>2</sub>) por la presión barométrica, menos la presión de vapor de agua.

$$P_{iO_2} = F_{iO_2} (P_B - P_{H_2O})$$

O sea, a nivel del mar:

$$P_{iO_2} = 0,21 (760 \text{ mmHg} - 47 \text{ mmHg}) = 149,7 \text{ mmHg}$$

Por otra parte, la concentración de CO<sub>2</sub> en el gas alveolar, depende de su producción y de la ventilación alveolar. El volumen de CO<sub>2</sub> producido por unidad de tiempo ( $\dot{V}_{ECO_2}$ ) es igual

a la ventilación alveolar ( $\dot{V}_A$ ) multiplicado por la fracción alveolar de CO<sub>2</sub> ( $F_{ACO_2}$ ):

$$\dot{V}_{ECO_2} = \dot{V}_A \times F_{ACO_2}$$

Finalmente, la presión parcial de oxígeno a nivel alveolar se puede calcular mediante la "ecuación del aire alveolar":

$$P_{AO_2} = \frac{P_{ACO_2}}{R} + F$$

Donde R es la relación de intercambio gaseoso =  $\frac{\dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_{CO_2}}$  y F un factor de corrección que habitualmente se ignora, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$P_{AO_2} = F_{IO_2} (P_B - P_{H_2O}) - \frac{P_{ACO_2}}{R}$$

La ventilación alveolar, además, varía en las distintas regiones del pulmón, siendo mayor en las zonas de declive del mismo. De este modo, se produce una gradiente en que la ventilación por unidad de volumen sigue una gradiente en que va disminuyendo al ir subiendo de zonas de mayor declive a zonas de menor declive dependiendo del decúbito en que se encuentre el paciente. Las implicancias de este fenómeno escapan a los objetivos de este artículo y serán revisadas al analizar las relaciones ventilación/perfusión en futuras revisiones.

## REFERENCIAS

1. Powers KA, Dharmoon AS. Physiology, Pulmonary Ventilation and Perfusion. En StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021 Jan-. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539907/>
2. Levitzky M G, Pulmonary Physiology. McGraw-Hill Medical. New Orleans, Louisiana, USA, 2008.
3. West J B. Pulmonary Physiology. The essentials. Williams and Wilkins Co. Baltimore, Md, USA, 2016.
4. Herrera O. Enfermedades respiratorias infantiles. Editorial mediterráneo. Santiago, Chile, 2002.