

FISIOLOGÍA SISTEMA RESPIRATORIO

Introducción

La respiración es aquel proceso por el cual el organismo adquiere el suficiente oxígeno del aire para poder obtener aquella energía, en forma de ATP, imprescindible para el desarrollo de las funciones básicas del cuerpo humano.

El término respiración incluye tres funciones distintas aunque relacionadas entre sí:

1. Ventilación.
2. Intercambio de gases:
 - a. Aire – Sangre.
 - b. Sangre – Tejidos.
3. Utilización del oxígeno por parte de los tejidos.

La ventilación y el intercambio de gases entre el aire y la sangre constituye la **respiración externa**.

El intercambio de gases entre la sangre y los tejidos y la utilización del oxígeno por los tejidos constituye la **respiración interna**.

La ventilación es el proceso mecánico que desplaza el aire hacia dentro y hacia fuera de los pulmones. Debido a que la concentración de oxígeno del aire es mayor en los pulmones que en la sangre, el oxígeno difunde desde el aire hacia la sangre. Por el contrario, el dióxido de carbono, producto de deshecho de la respiración celular, se desplaza desde la sangre hacia el aire de los pulmones mediante la difusión correspondiente a su gradiente de concentración.

Debido a este intercambio de gases, el aire inspirado contiene más oxígeno y menos dióxido de carbono que el aire espirado.

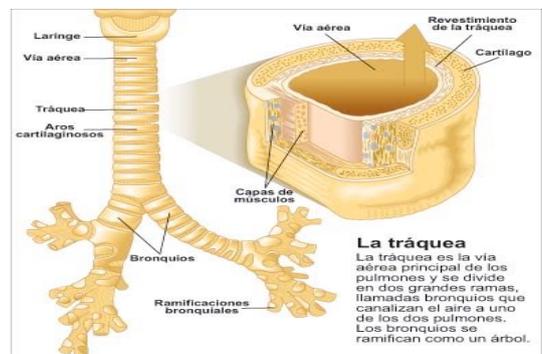
El intercambio de gases entre el aire y la sangre tiene lugar mediante **difusión simple** a través del tejido pulmonar. Esta difusión se realiza de manera muy rápida debido a la gran superficie que existe en el interior de los pulmones y a que la distancia entre la sangre y el aire es muy pequeña.

Estructura del sistema respiratorio

En el sistema respiratorio podemos distinguir dos zonas:

1. Zona de conducción:

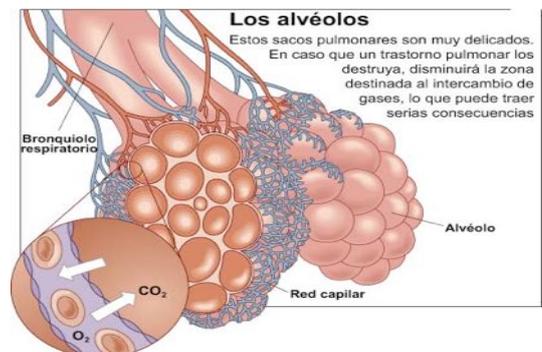
- Orofaringe y nasofaringe.
- Laringe.
- Tráquea.
- Bronquios y bronquiolos.



2. Zona respiratoria:

- Bronquiolos respiratorios.
- Alvéolos.

En la primera zona tiene lugar la conducción del aire y en la segunda zona tiene lugar el intercambio gaseoso.

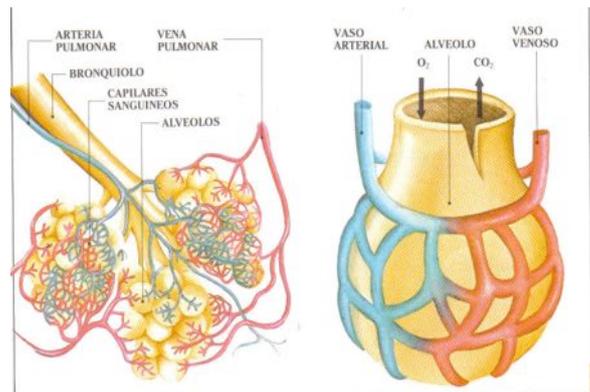


El intercambio de gases en los pulmones tiene lugar a través de aproximadamente 300 millones de cavidades respiratorias diminutas (0.25 a 0.50 mm de diámetro) denominadas alvéolos.

Cada alvéolo tiene el grosor de una capa celular, de manera que la barrera aire-sangre total sólo está constituida por dos células (una célula alveolar y una célula endotelial capilar), con aproximadamente 2 micras de grosor.

Existen dos tipos celulares en la pared alveolar, los llamados neumocitos I y los tipos II.

Los alvéolos tienen una forma poliédrica y se suelen agrupar en una configuración en panal de abejas. El aire que entra en uno de los alvéolos puede alcanzar a los demás miembros del grupo a través de poros pequeños. Generalmente estos grupos de alvéolos se encuentran en los extremos de los bronquiolos respiratorios, que son conductos respiratorios muy finos que finalizan en los alvéolos. A lo largo de la longitud de los bronquiolos respiratorios también pueden existir alvéolos individuales en forma de evaginaciones.



Para llegar el aire a esta zona de intercambio gaseoso, debe pasar por la denominada zona de conducción, constituida por boca, nariz, faringe, laringe, tráquea, bronquios principales y todas las ramificaciones sucesivas de bronquios y bronquiolos, incluyendo los bronquiolos terminales.

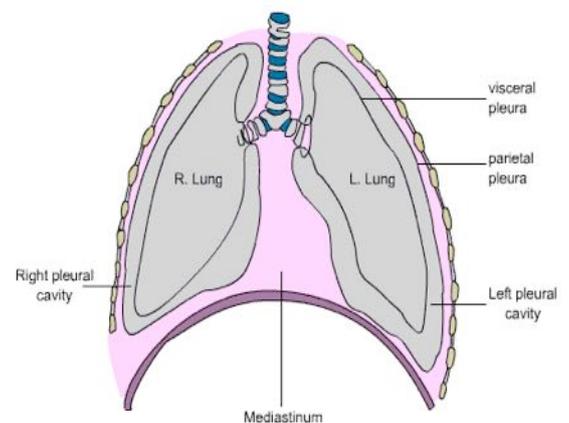
Además de conducir el aire hasta la zona respiratoria, estas estructuras tienen otras funciones adicionales:

- **Calentamiento y humidificación del aire inspirado.** Con independencia de la temperatura y humedad del aire ambiente, cuando el aire inspirado alcanza la zona respiratoria tiene una temperatura de $37^{\circ}C$ (temperatura corporal) y está saturado con vapor de agua.
- **Filtración y limpieza del aire inspirado.** El moco segregado por las células de las estructuras de la zona de conducción sirve para atrapar las partículas pequeñas en el aire inspirado y, así, realiza una función de filtración. Este material mucoso se desplaza a una velocidad de 1-2 cm por minuto, por acción de los cilios localizados en la parte superior de las células epiteliales que revisten la zona de conducción. Hay aproximadamente 300 cilios por célula que se mueven de manera coordinada para desplazar el moco hacia la faringe, en donde puede ser deglutido o expectorado.

Como consecuencia de la función de filtración, las partículas mayores de aproximadamente 6 micras no alcanzan normalmente la zona respiratoria de los pulmones. Además, los alvéolos se mantienen limpios por acción de los macrófagos alveolares. Este efecto de limpieza de los cilios y macrófagos en los pulmones disminuye con el humo de los cigarrillos.

Cavidad torácica

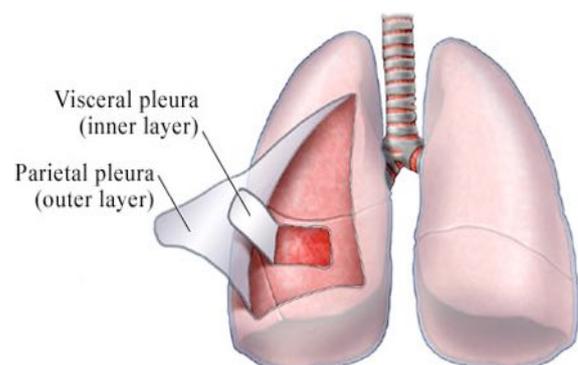
El **diafragma** es un músculo estriado con forma de cúpula que divide en dos partes la cavidad corporal anterior. El área que queda por debajo del diafragma se denomina **cavidad abdominopélvica** y la que queda por encima se denomina **cavidad torácica**, la cual contiene el corazón, los vasos sanguíneos, la tráquea, el esófago y el timo en su porción central, en un espacio virtual denominado mediastino. Las regiones derecha e izquierda de la cavidad torácica están ocupadas por los pulmones respectivos.



Los pulmones se encuentran cubiertos por dos capas de una membrana epitelial húmeda denominada pleura.

- **Pleura parietal:** Es la capa superficial, la cual reviste la parte interna de la cavidad torácica.
- **Pleura visceral:** Es la capa profunda, la cual cubre la superficie de los pulmones.

Entre ambas pleuras existe un espacio intrapleural que contiene mínimas cantidades de líquido lubricante y que, en condiciones normales no debe contener aire. La entrada de éste en dicho espacio (situación denominada neumotórax) puede producir el colapso pulmonar.



Aspectos físicos de la ventilación

El movimiento de aire desde las zonas de presión alta a las de presión baja, entre la zona de conducción y los bronquiolos terminales, se debe a la diferencia de presión existente entre los dos extremos de la vía respiratoria.

El flujo de aire a través de los bronquiolos terminales es directamente proporcional a la diferencia de presión e inversamente proporcional a la resistencia de rozamiento que presenta el flujo.

Las pleuras visceral y parietal están normalmente en contacto entre sí, de manera que los pulmones se ajustan a la pared torácica de la misma forma que dos trozos mojados de cristal se adhieren uno a otro. Ya hemos dicho que el espacio intrapleural sólo contiene una película de líquido segregado por las dos membranas.

Debido a que los pulmones permanecen normalmente en contacto con la pared torácica, se expanden y contraen al tiempo que la cavidad torácica durante los movimientos respiratorios.

El aire se introduce en los pulmones durante la respiración debido a que la presión atmosférica es mayor que la presión intrapulmonar o intraalveolar. Dado que la presión atmosférica no suele cambiar, la presión intrapulmonar debe disminuir por debajo de la presión atmosférica para que tenga lugar la inspiración. Esta presión inferior a la de la atmósfera se denomina presión subatmosférica o presión negativa, que durante la inspiración es de -3 mmHg con respecto a la atmosférica.

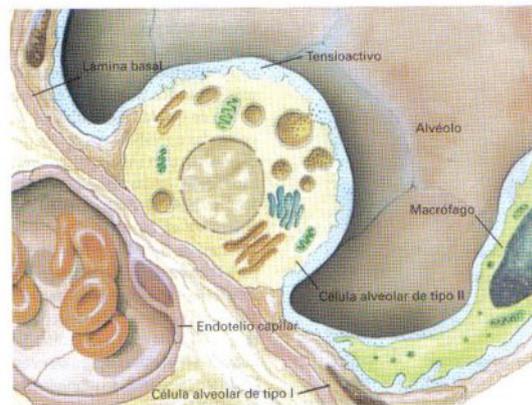
Por el contrario, la espiración tiene lugar cuando la presión intrapulmonar o intraalveolar es superior a la presión atmosférica, generalmente durante la espiración pasiva es de $+3$ mmHg con respecto a la atmosférica.

La ausencia de aire en el espacio intrapleural da lugar a una presión intrapleural subatmosférica que es inferior a la intrapulmonar, con lo que existe una diferencia de presión entre la presión intrapulmonar y la intrapleural, denominada **presión transpulmonar o transpleural**. Esta diferencia de presión hace que los pulmones se mantengan en contacto con la pared torácica, por lo que las modificaciones del volumen pulmonar evolucionan en paralelo a los cambios del volumen torácico durante la inspiración y la espiración.

Para que tenga lugar la inspiración es necesario que los pulmones puedan expandirse cuando se distienden, es decir, deben tener una distensibilidad elevada. Para que tenga lugar la espiración, los pulmones se deben hacer más pequeños cuando se libera esta tensión; es decir, deben presentar elasticidad. Esta tendencia a hacerse más pequeños también se facilita por las fuerzas de tensión superficial en el interior de los alvéolos.

Por tanto las propiedades físicas de los pulmones son:

1. **Distensibilidad:** Se puede definir como la modificación del volumen pulmonar por cada unidad de cambio de presión transpulmonar. Es decir, una presión transpulmonar dada producirá una expansión mayor o menor del pulmón según presente más o menos distensibilidad.
2. **Elasticidad:** Se refiere a la tendencia de una estructura a volver a su tamaño inicial tras haberse distendido. Debido a su contenido elevado de proteínas elastinas, los pulmones tienen una gran elasticidad y resisten a la distensión.
3. **Tensión superficial:** La fina película de líquido que existe normalmente en el alvéolo tiene una tensión superficial que se debe al hecho de que las moléculas de agua de la superficie son atraídas con mayor intensidad hacia otras moléculas de agua que hacia el aire. El resultado es que las moléculas de agua de la superficie están sujetas fuertemente por las fuerzas de atracción que actúan desde debajo de las mismas. Esta tensión superficial genera una fuerza con dirección interna que aumenta la presión en el interior del alvéolo.



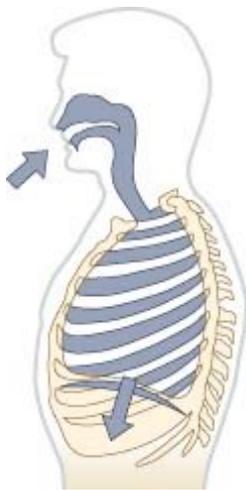
El líquido alveolar contiene un fosfolípido denominado dipalmitoil lecitina cuya función es la disminución de la tensión superficial. Este compuesto se denomina tensioactivo. Las moléculas de tensioactivo se entremezclan con las moléculas de agua y, de esta manera, disminuyen las fuerzas de atracción entre las moléculas de agua que son la causa de la tensión superficial. De esta manera, el tensioactivo disminuye la tensión superficial en el alvéolo. Además, la capacidad del tensioactivo para disminuir la tensión superficial mejora a medida que los alvéolos se hacen más pequeños durante la espiración. La razón puede ser el hecho de que las moléculas de tensioactivo quedan más concentradas a medida que el alvéolo se hace más pequeño.

Así, el tensioactivo impide el colapso alveolar durante la espiración. Incluso tras una espiración forzada, los alvéolos permanecen abiertos y en el interior de los pulmones queda un volumen residual de aire. Este tensioactivo es producido por los **neumocitos tipo II** en las fases avanzadas de la vida fetal.

Mecánica de la respiración

La ventilación pulmonar consta de dos fases:

1. Inspiración (inhalación): Se acompaña de aumento del volumen pulmonar y torácico.
2. Espiración (Exhalación): Se acompaña de disminución del volumen pulmonar y torácico.

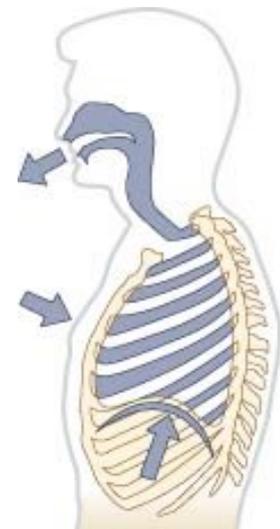


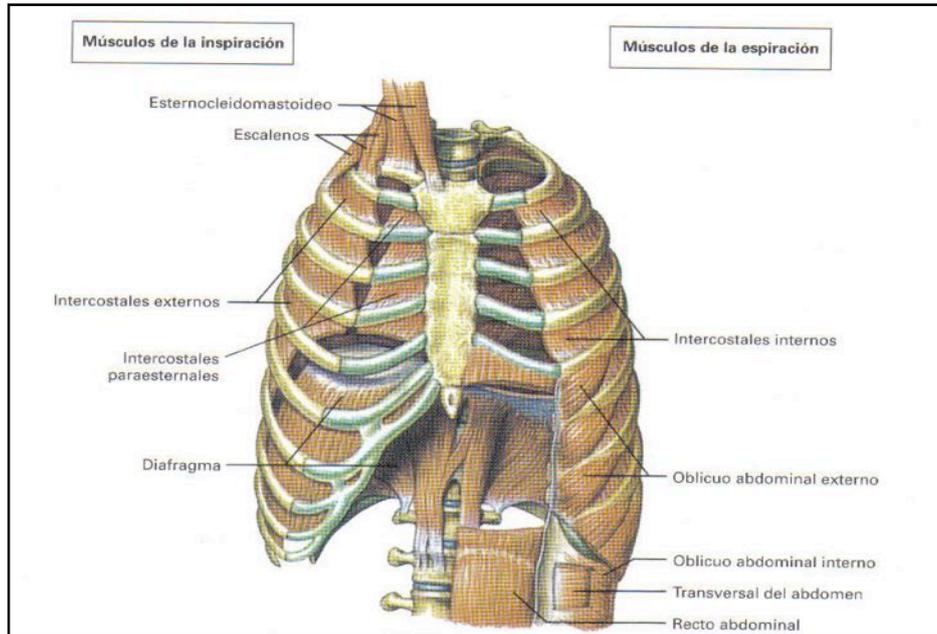
La inspiración tranquila y no forzada se debe principalmente a la contracción del **diafragma**, que desciende y se aplana cuando se contrae. Esto incrementa el volumen torácico en dirección vertical. Esta inspiración está facilitada por la contracción de los **músculos intercostales paraesternales y externos**, que eleva las costillas e incrementa el volumen torácico lateral.

En la inspiración forzada (profunda) participan otros músculos torácicos. Los más importantes son los escalenos, seguidos del pectoral menor y, en casos extremos, de los músculos esternocleidomastoideos. La contracción de estos músculos eleva las costillas en dirección anteroposterior; al mismo tiempo, la parte superior de la caja torácica queda estabilizada de manera que los intercostales pueden ser más eficaces.

La espiración tranquila es un proceso pasivo; es debida a la relajación muscular.

Durante la espiración forzada, los músculos intercostales internos se contraen. Los músculos abdominales también facilitan a la espiración debido a que su contracción hace que los órganos abdominales se compriman sobre el diafragma disminuyendo de esta manera el volumen del tórax.





Pruebas de función pulmonar

La función pulmonar se puede evaluar clínicamente mediante una técnica denominada **espirometría**.

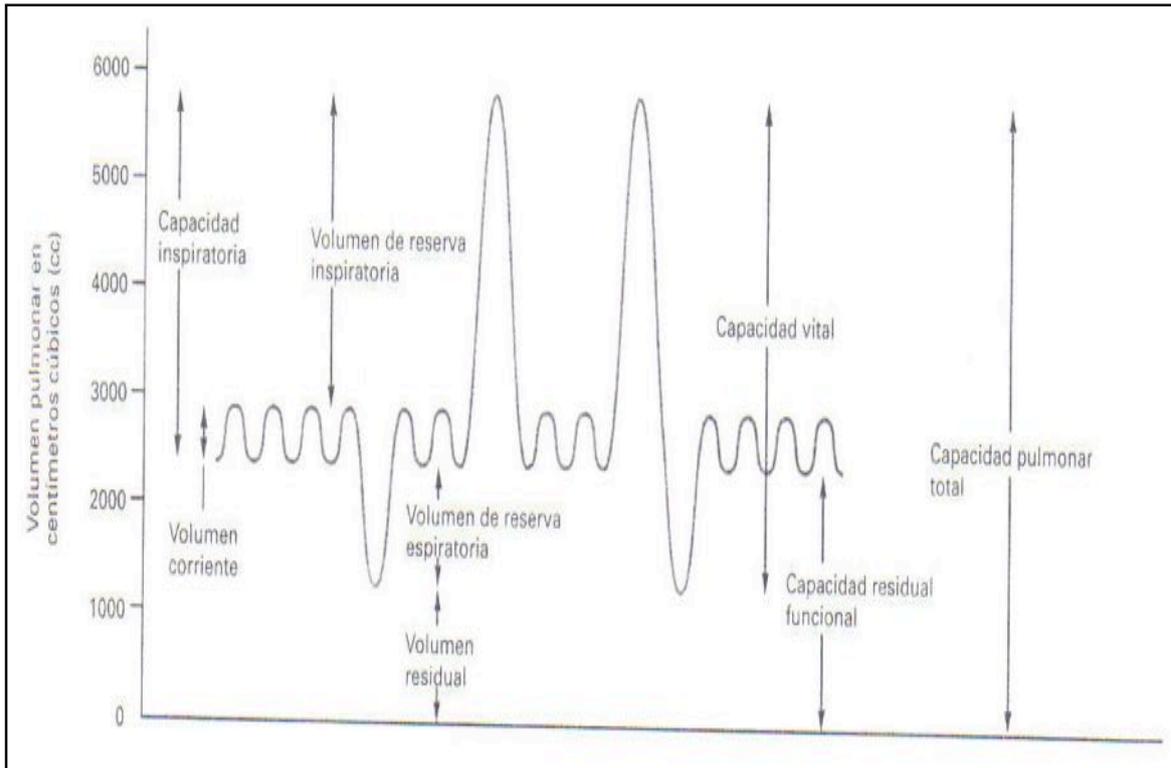
Con esta prueba se pueden determinar los volúmenes pulmonares según la situación:

- Durante la respiración tranquila la cantidad de aire espirado en cada movimiento inspiratorio es el **volumen corriente**.
- La cantidad máxima de aire que se puede expulsar de manera forzada tras una inhalación máxima es la **capacidad vital**, que es igual a la suma del volumen de reserva inspiratoria, del volumen corriente y del volumen de reserva espiratorio.
- El volumen que queda en los pulmones después de una espiración forzada es el **volumen residual**.
- La suma del volumen de reserva espiratorio y el volumen residual es la **capacidad residual funcional**.
- La suma de la capacidad vital y el volumen residual es la **capacidad pulmonar total**.



Es necesario tener en cuenta que no todo el volumen espirado alcanza los alvéolos en cada respiración. Cuando se efectúa la inhalación de aire fresco, ese aire se mezcla con el espacio muerto anatómico. Este espacio muerto está constituido por la zona de conducción del sistema respiratorio (nariz, boca, laringe, tráquea, bronquios y bronquiolos), en la que no tiene lugar el intercambio de gases.

El aire que permanece en el espacio muerto anatómico tiene una concentración menor de oxígeno y una concentración mayor de dióxido de carbono, en comparación con el aire externo.



El espacio muerto anatómico es una constante que comprende aproximadamente 150 ml de aire, por tanto, el porcentaje de aire fresco que alcanza los alvéolos será el resultado de aplicar la siguiente fórmula:

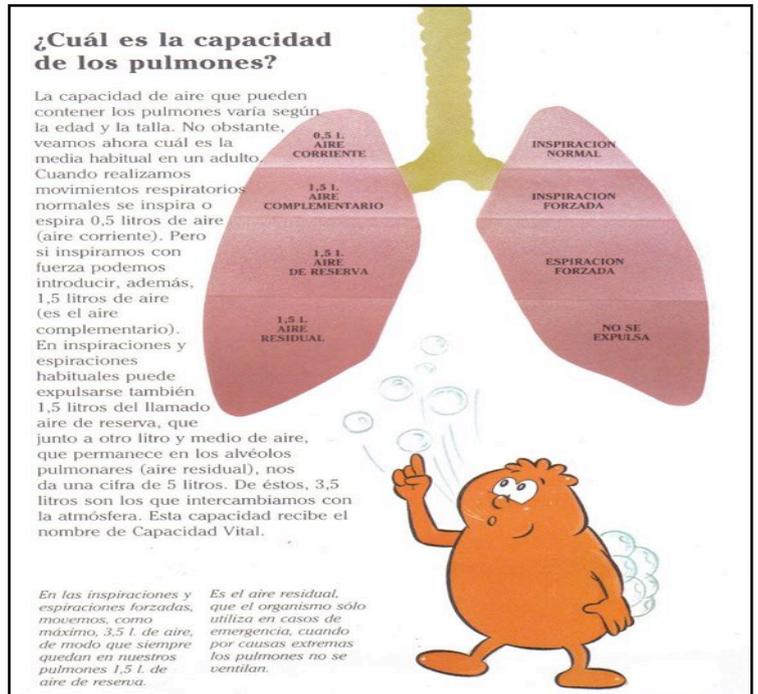
$$\text{Volumen corriente} - \text{Volumen espacio muerto}$$

$$\text{Porcentaje de aire fresco} = \frac{\text{Volumen corriente} - \text{Volumen espacio muerto}}{\text{Volumen corriente}} \times 100$$

$$\text{Volumen corriente}$$

Al aumentar el volumen corriente se aumenta el porcentaje de aire fresco que se introduce en los alvéolos. Por ejemplo, si el espacio muerto anatómico es de 150 ml y el volumen corriente de 500 ml, el porcentaje de aire fresco que alcanza los alvéolos es de $(500-150)/500 \times 100 = 350/500 \times 100 = 70\%$.

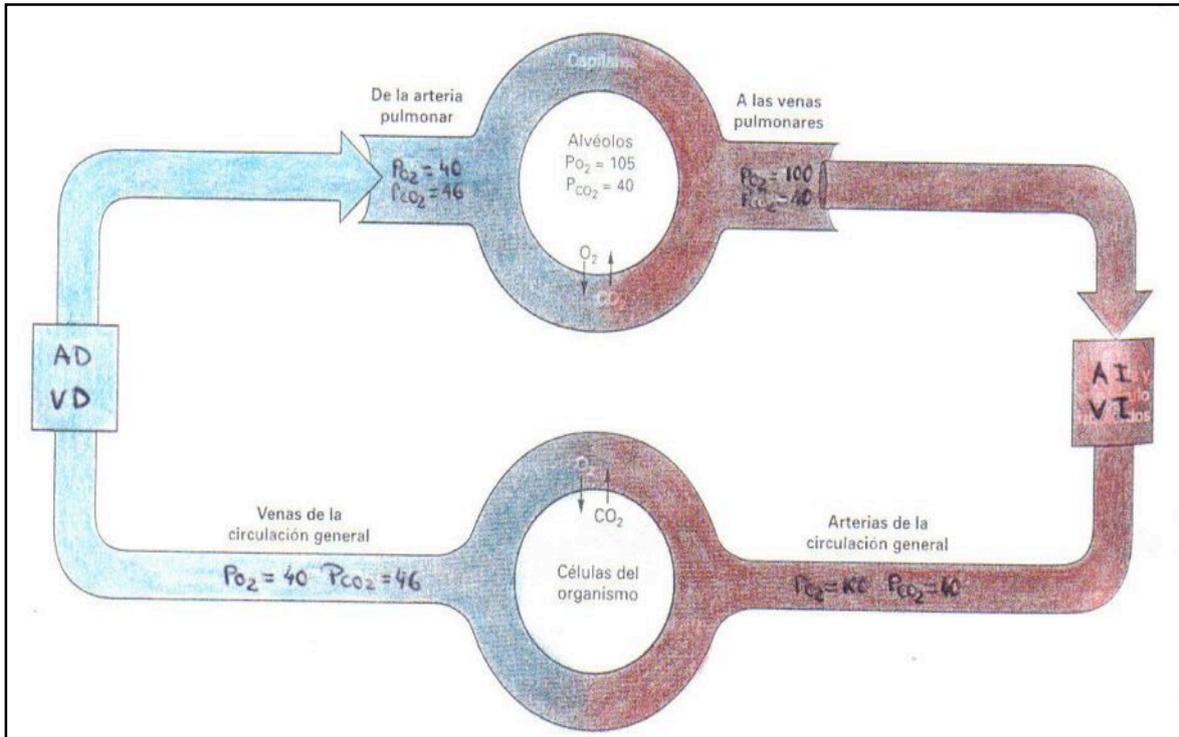
Si, debido a ejercicio físico, se aumenta el volumen corriente hasta 2000 ml, como se mantiene el espacio muerto anatómico en 150 ml, el porcentaje de aire fresco que llega a los alvéolos aumenta hasta $1850/2000 \times 100 = 93\%$.



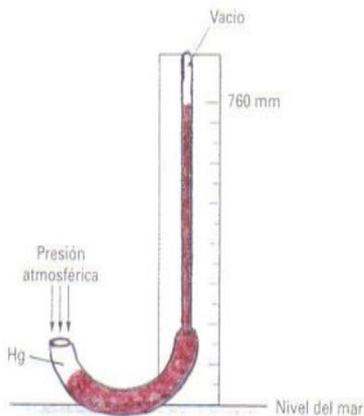
Intercambio de gases en los pulmones

El intercambio de gases entre el aire alveolar y la sangre de los capilares pulmonares da lugar al incremento de la concentración de oxígeno y a la disminución de la concentración de dióxido de carbono en la sangre que abandona los pulmones. Esta sangre entra en las arterias sistémicas en las que se realizan las determinaciones de gases en sangre para evaluar la eficacia de la función pulmonar.





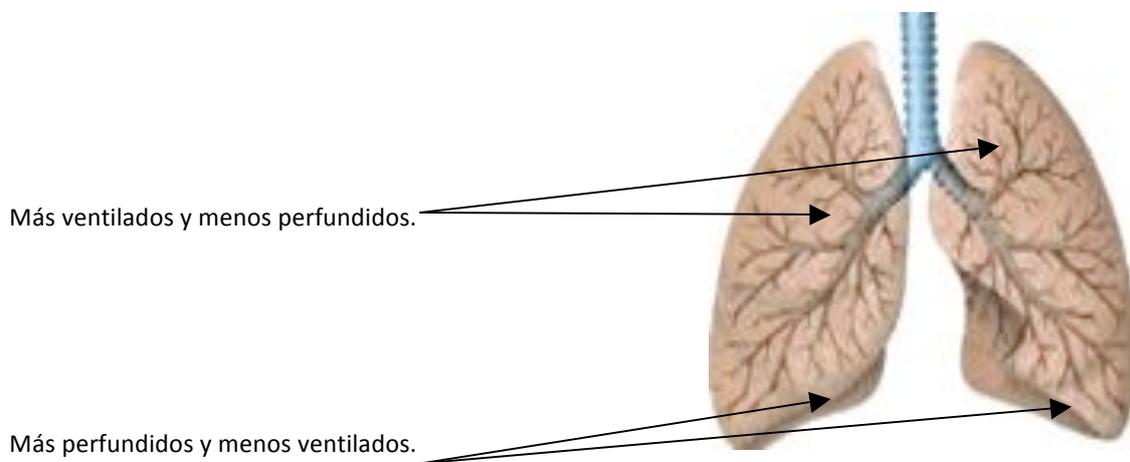
Según la ley de Dalton, la presión total que ejerce una mezcla gaseosa (como el aire) es igual a la suma de las presiones parciales de cada uno de los gases de la mezcla. El aire está compuesto básicamente de nitrógeno (78%), oxígeno (21%) y dióxido de carbono (1%).



Presión atmosférica a nivel del mar es de 760 mmHg, y a medida que aumentamos la altura la presión atmosférica va disminuyendo; de hecho en la cima del monte Everest la presión atmosférica disminuye hasta unos 300 mmHg, por lo que la presión parcial de los gases que la componen disminuirá también.

La enorme superficie de los alvéolos y la escasa distancia de difusión entre el aire alveolar y la sangre capilar son factores útiles para que la sangre pueda alcanzar un equilibrio gaseoso rápido con el aire alveolar. Esta función también está facilitada por el número elevado de capilares que rodean a cada alvéolo y que forman una capa casi continua de sangre alrededor del mismo.

La determinación sanguínea de las presiones parciales de oxígeno y de dióxido de carbono, constituye un buen índice de la función pulmonar. Así cuando el aire inspirado presenta una PO_2 normal pero la PO_2 arterial es baja, se puede concluir que está alterado el intercambio de gases de los pulmones, con la peculiaridad de que cuando los pulmones funcionan adecuadamente, la PO_2 arterial es ligeramente inferior a la PO_2 alveolar (alrededor de 5 mmHg), situación que se denomina **shunt pulmonar fisiológico**. Esto se explica porque funcionalmente el vértice pulmonar está ventilado que perfundido por sangre, a diferencia de las bases pulmonares que están más profundidas que ventiladas.



El hecho de que pasen eritrocitos por capilares pulmonares que se localizan en unidades alveolares no ventiladas al 100% hace que estos eritrocitos pasen a la circulación sistémica sin estar suficientemente oxigenados. Esta es la causa del shunt pulmonar fisiológico. Si este shunt fuera superior a 5 mmHg estaríamos hablando de situación patológica.

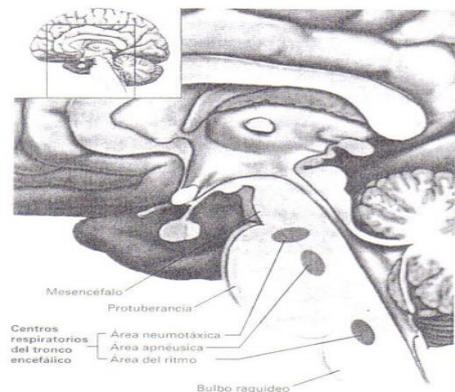
Regulación de la respiración

La inspiración y la espiración se deben a la contracción y relajación de los músculos esqueléticos en respuesta a la actividad de neuronas motoras somáticas de la médula espinal.

La actividad de estas neuronas está controlada, a su vez, por vías descendentes procedentes de neuronas localizadas en los centros de control de la respiración en el bulbo raquídeo y protuberancia (respiración involuntaria), y de las neuronas de la corteza cerebral (respiración voluntaria).

Los centros respiratorios del tronco encefálico son:

1. **Centro del ritmo.** Localizado en la sustancia reticular del bulbo raquídeo.
2. **Centro apnéusico.** Localizado en la protuberancia.
3. **Centro neumotáxico.** Localizado en la protuberancia.



El control automático de la respiración está influido por la información procedente de receptores sensibles a la composición química de la sangre.

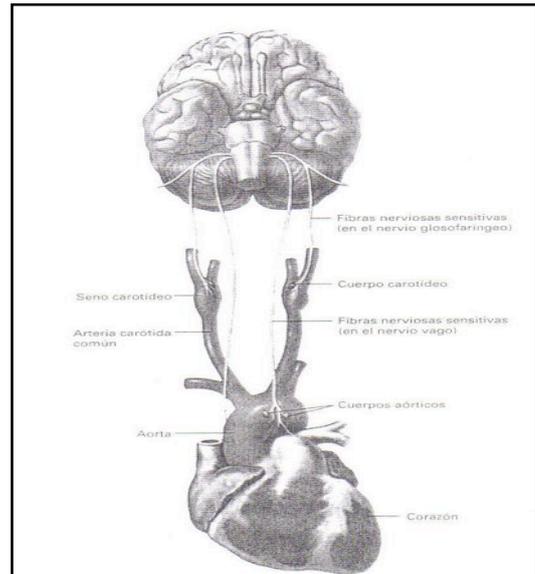
Existen dos grupos de quimiorreceptores que responden a las modificaciones de la PCO_2 , el pH y la PO_2 sanguíneos:

- Quimiorreceptores centrales: Localizados en el bulbo raquídeo.
- Quimiorreceptores periféricos:
 - Cuerpos aórticos: Localizados en el cayado aórtico.
 - Cuerpos carotídeos: Localizados en la zona de ramificación de la carótida común en carótida interna y externa.

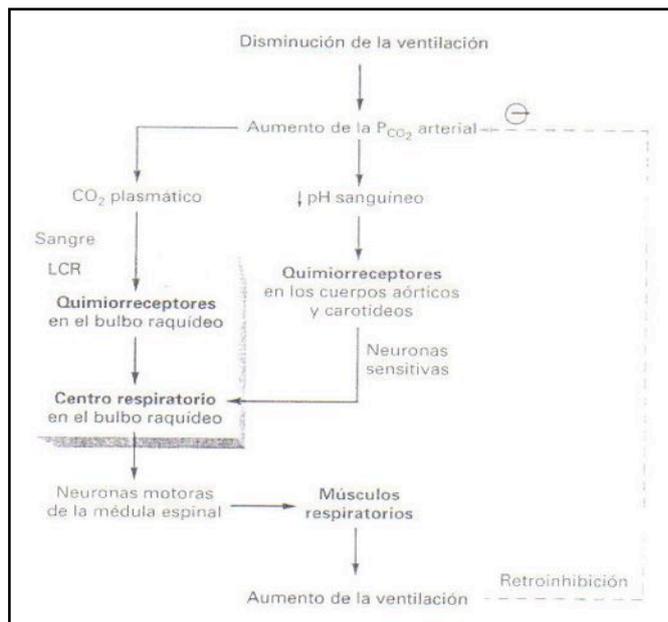
¡Atención!!!. Los cuerpos aórticos y carotídeos NO se deben confundir con los senos aórticos y carotídeos localizados en estas arterias. Recordad que los senos aórticos y carotídeos contienen receptores para el control de la presión sanguínea.

Los quimiorreceptores controlan la respiración de manera indirecta a través de fibras nerviosas sensitivas que llegan al bulbo raquídeo:

- Los cuerpos aórticos envían información al bulbo a través del nervio vago (X par craneal).
- Los cuerpos carotídeos estimulan las fibras del nervio glossofaríngeo (IX par craneal).



En la siguiente figura se muestra el control de la ventilación mediante retroinhibición a través e los cambios de la PCO_2 y el pH de la sangre.



El aumento de la PCO_2 y el consecuente descenso del pH sanguíneo activa los quimiorreceptores en los cuerpos aórticos y carotídeos, los cuales envían la información, a través de los nervios vago y glossofaríngeo, al centro respiratorio del bulbo raquídeo, el cual, a través de neuronas motoras de la medula espinal, ordenará la contracción de la musculatura respiratoria y, en consecuencia, el aumento de la ventilación.