

Fisiología respiratoria

Ventilación pulmonar

Los cuatro componentes principales de la respiración son: 1) *ventilación pulmonar*, que se refiere al flujo de entrada y salida de aire entre la atmósfera y los alvéolos pulmonares; 2) *difusión de oxígeno (O₂) y de dióxido de carbono (CO₂) entre los alvéolos y la sangre*; 3) *transporte de oxígeno y de dióxido de carbono en la sangre y los líquidos corporales hacia las células de los tejidos corporales y desde las mismas*, y 4) *regulación de la ventilación y otras facetas de la respiración*.

Mecánica de la ventilación pulmonar

Músculos que causan la expansión y contracción pulmonar

Los pulmones se pueden expandir y contraer de dos maneras: 1) mediante el movimiento hacia abajo y hacia arriba del diafragma para alargar o acortar la cavidad torácica, y 2) mediante la elevación y el descenso de las costillas para aumentar y reducir el diámetro anteroposterior de la cavidad torácica.

La respiración tranquila normal se consigue casi totalmente por el primer mecanismo, es decir, por el movimiento del diafragma. Durante la espiración el diafragma simplemente se relaja, y el *retroceso elástico* de los pulmones, de la pared torácica y de las estructuras abdominales comprime los pulmones y expulsa el aire. El segundo método para expandir los pulmones es elevar la caja torácica. Al elevarla se expanden los pulmones porque, en la posición de reposo natural, las costillas están inclinadas hacia abajo.

cuando la caja costal se eleva, las costillas se desplazan hacia adelante casi en línea recta, de modo que el esternón también se mueve hacia delante, alejándose de la columna vertebral y haciendo que el diámetro anteroposterior del tórax sea aproximadamente un 20% mayor durante la inspiración máxima que durante la espiración

Los músculos más importantes que elevan la caja torácica son los *intercostales externos*, aunque otros músculos que contribuyen son: 1) los músculos *esternocleidomastoideos*, que elevan el esternón; 2) los *serratos anteriores*, que elevan muchas de las costillas, y 3) los *escalenos*, que elevan las dos primeras costillas.

Presiones que originan el movimiento de entrada y salida de aire de los pulmones

El pulmón es una estructura elástica que se colapsa como un globo y expulsa el aire a través de la tráquea siempre que no haya ninguna fuerza que lo mantenga insuflado. Además, no hay uniones entre el pulmón y las paredes de la caja torácica, excepto en el punto en el que está suspendido del *mediastino*, la sección media de la cavidad torácica, en el hilio. Por el contrario, el pulmón «flota» en la cavidad torácica, rodeado por una capa delgada de *líquido pleural* que lubrica el movimiento de los pulmones en el interior de la cavidad.

Presión pleural y sus cambios durante la respiración

La *presión pleural* es la presión del líquido que está en el delgado espacio que hay entre la pleura pulmonar y la pleura de la pared torácica. Como se ha señalado antes, esta presión es normalmente

una aspiración ligera, lo que significa que hay una presión ligeramente *negativa*. La presión pleural normal al comienzo de la inspiración es de aproximadamente -5 cmH₂O, que es la magnitud de la aspiración necesaria para mantener los pulmones expandidos hasta su nivel de reposo.

Presión alveolar: presión del aire en el interior de los alvéolos pulmonares

Cuando la glotis está abierta y no hay flujo de aire hacia el interior ni el exterior de los pulmones, las

presiones en todas las partes del árbol respiratorio, hasta los alvéolos, son iguales a la presión atmosférica, que se considera que es la presión de referencia cero en las vías aéreas (es decir, presión

de 0 cmH₂O). Durante la espiración, la presión alveolar aumenta hasta aproximadamente $+1$ cmH₂O, lo que fuerza la salida del 0,5 l de aire inspirado desde los pulmones durante los 2 a 3 s de la espiración.

Distensibilidad de los pulmones

El volumen que se expanden los pulmones por cada aumento unitario de presión transpulmonar (si se da tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio) se denomina *distensibilidad pulmonar*. La distensibilidad pulmonar total de los dos pulmones en conjunto en el ser humano adulto normal es en promedio de aproximadamente 200 ml de aire por cada cmH₂O de presión transpulmonar. Es decir, cada vez que la presión transpulmonar aumenta 1 cmH₂O, el volumen pulmonar, después de 10 a 20 s, se expande 200 ml

Principio de la tensión superficial

Cuando el agua forma una superficie con el aire, las moléculas de agua de la superficie del agua tienen una atracción especialmente intensa entre sí. En consecuencia, la superficie del agua siempre está intentando contraerse.

Invirtamos ahora estos principios y veamos qué ocurre en las superficies internas de los alvéolos.

El surfactante y su efecto sobre la tensión superficial

Es secretado por células epiteliales especiales secretoras de surfactante denominadas *células epiteliales alveolares de tipo II*, que constituyen aproximadamente el 10% del área superficial de los alvéolos. El surfactante es una mezcla compleja de varios fosfolípidos, proteínas e iones. Los componentes más importantes son el fosfolípido *dipalmitoilfosfatidilcolina*, las *apoproteínas del surfactante* e *iones calcio*.

La dipalmitoilfosfatidilcolina, junto a otros fosfolípidos menos importantes, es responsable de la reducción de la tensión superficial. Realiza esta función porque no se disuelve de manera uniforme en el líquido que tapiza la superficie alveolar, sino que parte de la molécula se disuelve, mientras que el resto permanece sobre la superficie del agua en los alvéolos.

Efecto de la caja torácica sobre la expansibilidad pulmonar

Hasta ahora hemos analizado la capacidad de expansión de los pulmones de manera aislada, sin considerar la caja torácica. La caja torácica tiene sus propias características elásticas y viscosas, similares a las de los pulmones; incluso si los pulmones no estuvieran presentes en el tórax, seguiría siendo necesario un esfuerzo muscular para expandir la caja torácica.

Distensibilidad del tórax y de los pulmones en conjunto

La distensibilidad de todo el sistema pulmonar (los pulmones y la caja torácica en conjunto) se mide cuando se expanden los pulmones de una persona relajada o paralizada totalmente

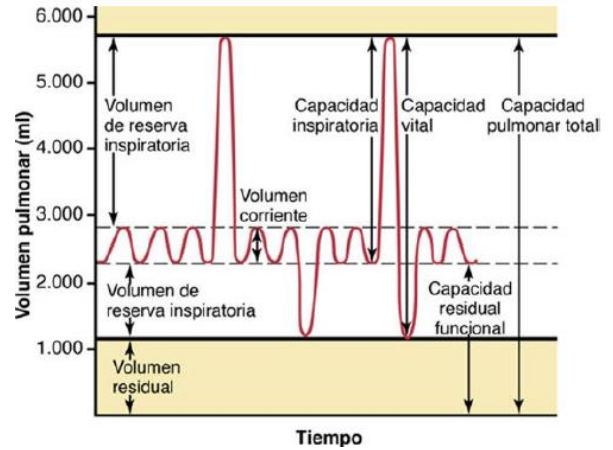
Para insuflar este sistema pulmonar total es necesario casi el doble de presión que para insuflar los mismos pulmones después de extraerlos de la caja torácica. Por tanto, la distensibilidad del sistema pulmón-tórax combinado es casi exactamente la mitad que la de los

pulmones solos, 110 ml de volumen por cada cmH₂O de presión para el sistema combinado, en comparación con 200 ml/cmH₂O para los pulmones de manera aislada.

Volúmenes y capacidades pulmonares

Registro de las variaciones del volumen pulmonar: espirometría

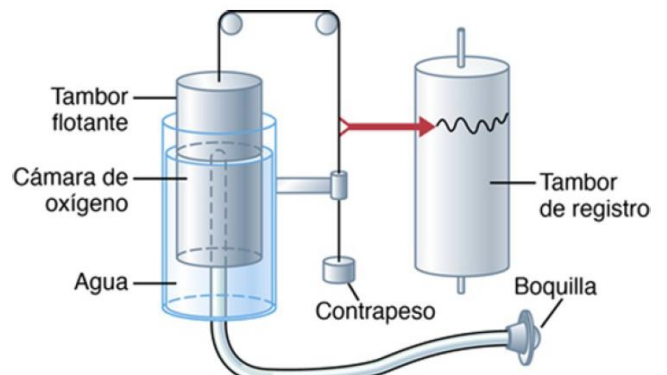
La ventilación pulmonar puede estudiarse registrando el movimiento del volumen del aire que entra y sale de los pulmones, un método que se denomina *espirometría*. Está formado por un tambor invertido sobre una cámara de agua, con el tambor equilibrado por un peso. En el tambor hay un gas respiratorio, habitualmente aire u oxígeno; un tubo conecta la boca con la cámara de gas. Cuando se respira hacia el interior y el exterior de la cámara, el tambor se eleva y descende, y se hace un registro adecuado en una hoja de papel en movimiento.



Volúmenes pulmonares

El significado de cada uno de estos volúmenes es el siguiente:

1. El *volumen corriente* es el volumen de aire que se inspira o se espira en cada respiración normal; es igual a aproximadamente 500 ml en el hombre adulto medio.
2. El *volumen de reserva inspiratoria* es el volumen adicional de aire que se puede inspirar desde un volumen corriente normal y por encima del mismo cuando la persona inspira con una fuerza plena; habitualmente es igual a aproximadamente 3.000 ml.
3. El *volumen de reserva espiratoria* es el volumen adicional máximo de aire que se puede espirar mediante una espiración forzada después del final de una espiración a volumen corriente normal;



normalmente, este volumen es igual a aproximadamente 1.100 ml.

4. El *volumen residual* es el volumen de aire que queda en los pulmones después de la espiración más forzada; este volumen es en promedio de aproximadamente 1.200 ml.

Capacidades pulmonares

1. La *capacidad inspiratoria* es igual al *volumen corriente* más el *volumen de reserva inspiratoria*. Esta capacidad es la cantidad de aire (aproximadamente 3.500 ml) que una persona puede inspirar, comenzando en el nivel espiratorio normal y distendiendo los pulmones hasta la máxima cantidad.

2. La *capacidad residual funcional* es igual al *volumen de reserva espiratoria* más el *volumen residual*. Esta capacidad es la cantidad de aire que queda en los pulmones al final de una espiración normal (aproximadamente 2.300 ml).

3. La *capacidad vital* es igual al *volumen de reserva inspiratoria* más el *volumen corriente* más el *volumen de reserva espiratoria*. Esta capacidad es la cantidad máxima de aire que puede expulsar una persona desde los pulmones después de llenar antes los pulmones hasta su máxima dimensión y después espirando la máxima cantidad (aproximadamente 4.600 ml).

4. La *capacidad pulmonar total* es el volumen máximo al que se pueden expandir los pulmones con el máximo esfuerzo posible (aproximadamente 5.800 ml); es igual a la *capacidad vital* más el *volumen residual*.

Determinación de la capacidad residual funcional, el volumen residual y la capacidad pulmonar total: método de dilución de helio

La capacidad residual funcional (CRF), que es el volumen de aire que queda en los pulmones al final de una espiración normal, es importante en la función pulmonar. Como su valor se altera mucho en algunos tipos de enfermedad pulmonar, con frecuencia es deseable medir esta capacidad. Se llena un espirómetro de volumen conocido con aire mezclado con helio a una concentración conocida. Antes de respirar del espirómetro la persona hace una espiración normal. Al final de esta espiración, el volumen que queda en los pulmones es igual a la CRF. En consecuencia, el helio es diluido por los gases de la CRF, y se puede calcular el volumen de la CRF a partir del grado de dilución del helio, utilizando la fórmula siguiente:

$$CRF = \left(\frac{C_{iHe}}{C_{fHe}} - 1 \right) V_{iEspir}$$

donde *CRF* es la capacidad residual funcional, *C_{iHe}* es la concentración inicial de helio en el espirómetro, *C_{fHe}* es la concentración final de helio en el espirómetro y *V_{iEspir}* es el volumen inicial del espirómetro.

Ventilación alveolar

En último término, la función de la ventilación pulmonar es renovar continuamente el aire de las zonas de intercambio gaseoso de los pulmones, en las que el aire está próximo a la sangre pulmonar.

Estas zonas incluyen los alvéolos, los sacos alveolares, los conductos alveolares y los bronquíolos respiratorios. La velocidad a la que llega a estas zonas el aire nuevo se denomina *ventilación alveolar*.

Frecuencia de la ventilación alveolar

La ventilación alveolar por minuto es el volumen total de aire nuevo que entra en los alvéolos y zonas adyacentes de intercambio gaseoso cada minuto. Es igual a la frecuencia respiratoria multiplicada por

la cantidad de aire nuevo que entra en estas zonas con cada respiración.

La ventilación alveolar es uno de los principales factores que determinan las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono en los alvéolos. Por tanto, casi todos los análisis del intercambio

gaseoso de los capítulos siguientes del aparato respiratorio ponen de relieve la

ventilación alveolar $\dot{V}_A = \text{Frec} \times (V_C - V_M)$.

Circulación pulmonar, edema pulmonar, líquido pleural

El pulmón tiene dos circulaciones: una *circulación de bajo flujo y alta presión* y una *circulación de alto flujo y baja presión*. La *circulación de bajo flujo y alta presión* aporta la sangre arterial sistémica

a la tráquea, el árbol bronquial incluidos los bronquíolos terminales, los tejidos de sostén del pulmón y las capas exteriores (adventicias) de las arterias y venas pulmonares. Las *arterias bronquiales*, que

son ramas de la aorta torácica, irrigan la mayoría de esta sangre arterial sistémica a una presión solo ligeramente inferior a la presión aórtica. La *arteria pulmonar*, que recibe sangre del

ventrículo derecho, y sus ramas arteriales transportan sangre a los capilares alveolares para el intercambio gaseoso y a las venas pulmonares y después devuelven la sangre a la aurícula izquierda

para su bombeo por el ventrículo izquierdo a través de la circulación sistémica.

Anatomía fisiológica del sistema circulatorio pulmonar

Vasos pulmonares

La arteria pulmonar se extiende solo 5 cm más allá de la punta del ventrículo derecho y después se divide en las ramas principales derecha e izquierda, que vascularizan los dos pulmones correspondientes. La arteria pulmonar tiene un grosor de pared un tercio del de la aorta. Las ramas de las arterias pulmonares son cortas, y todas las arterias pulmonares, incluso las arterias más pequeñas y las arteriolas, tienen diámetros mayores que sus correspondientes arterias sistémicas

Las venas pulmonares, al igual que las arterias pulmonares, también son cortas. Drenan

inmediatamente la sangre que les llega hacia la aurícula izquierda.

Vasos bronquiales

La sangre también fluye hacia los pulmones a través de arterias bronquiales pequeñas que se originan en la circulación sistémica y transportan el 1-2% del gasto cardíaco total. Esta sangre arterial bronquial es sangre *oxigenada*, al contrario de la sangre parcialmente desoxigenada de las arterias pulmonares.

Después de que esta sangre bronquial y arterial pase a través de los tejidos de soporte, drena hacia las venas pulmonares y *entra en la aurícula izquierda*, en lugar de regresar hacia la aurícula derecha. Por tanto, el flujo hacia la aurícula izquierda y el gasto del ventrículo izquierdo son aproximadamente un 1-2% mayores que el gasto del ventrículo derecho.

Linfáticos

Hay vasos linfáticos en todos los tejidos de soporte del pulmón, comenzando en los espacios tisulares conjuntivos que rodean a los bronquiolos terminales, y siguiendo hacia el hilio del pulmón, y desde aquí principalmente hacia el *conducto linfático torácico derecho*.

Presiones en el sistema pulmonar

Curva del pulso de presión del ventrículo derecho

Estas curvas se comparan con la curva de presión aórtica, que es mucho más elevada, y que se muestra en la porción superior de la figura. La presión sistólica del ventrículo derecho del ser humano normal es en promedio de aproximadamente 25 mmHg, y la presión diastólica es en promedio de aproximadamente 0 a 1 mmHg, valores que son solo un quinto de los del ventrículo izquierdo.

Presiones en la arteria pulmonar

Durante la *sístole* la presión en la arteria pulmonar es esencialmente igual a la presión que hay en el ventrículo derecho, después del cierre de la válvula pulmonar al final de la sístole, la presión ventricular cae súbitamente, mientras que la presión arterial pulmonar disminuye más lentamente a medida que la sangre fluye a través de los capilares de los pulmones. la *presión arterial pulmonar sistólica* se sitúa normalmente en promedio en unos 25 mmHg en el ser humano, la *presión arterial pulmonar diastólica* es de aproximadamente 8 mmHg y la *presión arterial pulmonar media* es de 15 mmHg.

Presiones auricular izquierda y venosa pulmonar

La presión media en la aurícula izquierda y en las venas pulmonares principales es en promedio de aproximadamente 2 mmHg en el ser humano en decúbito, y varía desde un valor tan bajo como

1 mmHg hasta uno tan elevado como 5 mmHg. Sin embargo, con frecuencia se puede estimar la presión auricular izquierda con una exactitud moderada midiendo la denominada *presión de enclavamiento pulmonar*. Esta medida se consigue introduciendo un catéter en primer lugar a través de una vena periférica hasta la aurícula derecha, después a través del lado derecho del corazón y a través de la arteria pulmonar hacia una de las pequeñas ramas de la arteria pulmonar, y finalmente empujando el catéter hasta que *se enclava firmemente en la rama pequeña*.

Volumen sanguíneo de los pulmones

El volumen de la sangre de los pulmones es de aproximadamente 450 ml, aproximadamente el 9% del volumen de sangre total de todo el aparato circulatorio.

Aproximadamente 70 ml de este volumen de sangre pulmonar están en los capilares pulmonares, y el resto se divide aproximadamente por igual entre las arterias y las venas pulmonares.

Los pulmones sirven como reservorio de sangre

En varias situaciones fisiológicas y patológicas la cantidad de sangre de los pulmones puede variar desde tan poco como la mitad del valor normal hasta el doble de lo normal. cuando una

persona sopla aire con tanta intensidad que se genera una presión elevada en los pulmones (como cuando se toca una trompeta), se pueden expulsar hasta 250 ml de sangre desde el aparato circulatorio pulmonar hacia la circulación sistémica

Flujo sanguíneo a través de los pulmones y su distribución

El flujo sanguíneo a través de los pulmones es esencialmente igual al gasto cardíaco. Por tanto, los factores que controlan el gasto cardíaco también controlan el flujo sanguíneo pulmonar. En la mayoría de las situaciones los vasos pulmonares actúan como tubos distensibles que se dilatan al aumentar la presión y se estrechan al disminuir la presión.

La disminución del oxígeno alveolar reduce el flujo sanguíneo alveolar local y regula la distribución del flujo sanguíneo pulmonar

Cuando la concentración de O₂ en el aire de los alvéolos disminuye por debajo de lo normal (especialmente cuando disminuye por debajo del 70% de lo normal [es decir, por debajo de 73 mmHg

de Po₂]) los vasos sanguíneos adyacentes se constriñen, con un aumento de la resistencia vascular demás de cinco veces a concentraciones de O₂ muy bajas. Este efecto es *opuesto al efecto que se observa en los vasos sistémicos*, que se dilatan en lugar de constreñirse en respuesta a concentraciones bajas de O₂. Aunque los mecanismos que promueven la vasoconstricción pulmonar durante la hipoxia no se conocen en profundidad, la baja concentración de O₂ puede estimular la liberación de sustancias

vasoconstrictoras o reducir la liberación de un vasodilatador, como el óxido nítrico, del tejido pulmonar.

Efecto de los gradientes de presión hidrostática de los pulmones sobre el flujo sanguíneo pulmonar regional

En el adulto en posición erguida el punto más bajo de los pulmones está normalmente unos 30 cm por debajo del punto más alto, lo que representa una diferencia de presión de 23 mmHg, de los cuales aproximadamente 15 mmHg están por encima del corazón y 8 por debajo. Estas diferencias de presión tienen efectos profundos sobre el flujo sanguíneo que atraviesa las diferentes zonas de los pulmones.

Zonas 1, 2 y 3 del flujo sanguíneo pulmonar

Zona 1: ausencia de flujo durante todas las porciones del ciclo cardíaco porque la presión capilar alveolar local en esa zona del pulmón nunca aumenta por encima de la presión del aire alveolar en ninguna fase del ciclo cardíaco.

Zona 2: flujo sanguíneo intermitente, solo durante los picos de presión arterial pulmonar, porque la

presión sistólica en ese momento es mayor que la presión del aire alveolar, pero la presión diastólica es menor que la presión del aire alveolar.

Zona 3: flujo de sangre continuo, porque la presión capilar alveolar es mayor que la presión del aire alveolar durante todo el ciclo cardíaco.

Normalmente los pulmones solo tienen flujo sanguíneo en las zonas 2 y 3, la zona 2 (flujo intermitente) en los vértices y la zona 3 (flujo continuo) en todas las zonas inferiores. Por ejemplo,

cuando una persona está en posición erguida la presión arterial pulmonar en el vértice pulmonar es aproximadamente 15 mmHg menor que la presión a nivel del corazón. Por tanto, la presión sistólica apical es de solo 10 mmHg (25 mmHg a nivel del corazón menos la diferencia de presión hidrostática de 15 mmHg).

El flujo sanguíneo de zona 1 solo se produce en situaciones anormales

El flujo sanguíneo de zona 1, que indica la ausencia de flujo durante todo el ciclo cardíaco, se produce cuando la presión arterial sistólica pulmonar es demasiado baja o cuando la presión alveolar es demasiado elevada para permitir que haya flujo.

El aumento del gasto cardíaco durante el ejercicio intenso es asumido normalmente por la circulación pulmonar sin grandes aumentos en la presión arterial pulmonar

Durante el ejercicio intenso el flujo sanguíneo a través de los pulmones puede aumentar entre cuatro y siete veces. Este flujo adicional se acomoda en los pulmones de tres formas: 1) aumentando el número de capilares abiertos, a veces hasta tres veces; 2) distendiendo todos los capilares y aumentando la velocidad del flujo a través de cada capilar a más del doble, y 3) aumentando la presión arterial pulmonar.

Función de la circulación pulmonar cuando la presión auricular izquierda se eleva como consecuencia de una insuficiencia cardíaca izquierda

La presión auricular izquierda de una persona sana casi nunca se eleva por encima de +6 mmHg, incluso durante el ejercicio más intenso. Estas pequeñas modificaciones de la presión auricular

izquierda prácticamente no tienen ningún efecto sobre la función de la circulación pulmonar porque simplemente expanden las vénulas pulmonares y abren más capilares, de modo que la sangre sigue

fluyendo con una facilidad casi igual desde las arterias pulmonares.

La elevación inicial de la presión auricular, de hasta aproximadamente 7 mmHg, tiene poco efecto sobre

la función de la circulación pulmonar.

Dinámica capilar pulmonar

El intercambio de gases entre el aire alveolar y la sangre capilar pulmonar se analiza en el capítulo 40.

Sin embargo, es importante señalar aquí que las paredes alveolares están tapizadas por tantos capilares que en la mayor parte de los sitios los capilares casi se tocan entre sí, adosados unos a otros.

Presión capilar pulmonar

Nunca se han realizado mediciones directas de la presión capilar pulmonar. Sin embargo, el método «isogravimétrico» de la presión capilar pulmonar.

Intercambio capilar de líquido en los pulmones y dinámica del líquido intersticial pulmonar

presión capilar funcional mucho mayor en los tejidos periféricos, de aproximadamente 17 mmHg.

2. La presión del líquido intersticial del pulmón es ligeramente más negativa que en el tejido subcutáneo periférico. (Esta presión se ha medido de dos formas: con una micropipeta insertada en el intersticio pulmonar, que da un valor de aproximadamente -5 mmHg, y midiendo la presión de absorción de líquido desde los alvéolos, que da un valor de aproximadamente -8 mmHg.)

3. La presión coloidosmótica del líquido intersticial pulmonar es de aproximadamente 14 mmHg, en comparación con menos de la mitad de este valor en los tejidos periféricos.

4. Las paredes alveolares son muy delgadas, y el epitelio alveolar que recubre las superficies alveolares es tan débil que se puede romper si la presión positiva en los espacios intersticiales es

mayor que la presión del aire alveolar (>0 mmHg), lo que permite el paso de líquido desde los espacios intersticiales hacia los alvéolos.

Presión intersticial pulmonar negativa y mecanismo para mantener «secos» los

alvéolos

¿Qué impide que los alvéolos se llenen de líquido en condiciones normales? Si se recuerda que los capilares pulmonares y el sistema linfático pulmonar normalmente mantienen una ligera *presión*

negativa en los espacios intersticiales, es evidente que siempre que aparezca líquido adicional en los alvéolos simplemente será aspirado mecánicamente hacia el intersticio pulmonar a través de las pequeñas aberturas que hay entre las células epiteliales alveolares.

Líquido en la cavidad pleural

Cuando los pulmones se expanden y se contraen durante la respiración normal se deslizan en el interior de la cavidad pleural. Para facilitar este movimiento hay una delgada capa de líquido mucoso entre las pleuras parietal y visceral.

1) el mediastino; 2) la superficie superior del diafragma, y 3) las superficies laterales de la pleura parietal. Por tanto, el *espacio pleural* (el espacio que hay entre las pleuras parietal y visceral) se denomina *espacio virtual* porque normalmente es tan estrecho que no es un espacio físico evidente.

«Presión negativa» en el líquido pleural

Siempre es necesaria una fuerza negativa en el exterior de los pulmones para mantener expandidos los pulmones. Esta fuerza es proporcionada por la presión negativa del espacio pleural normal. La causa básica de esta presión negativa es el bombeo de líquidos desde el espacio pleural por los linfáticos (que también es la base de la presión negativa que se encuentra en la mayor parte de los espacios tisulares del cuerpo).

PRINCIPIOS FÍSICOS DEL INTERCAMBIO GASEOSO; DIFUSIÓN DE OXIGENO Y DIOXIDO DE CARBONO A TRAVÉS DE LA MEMBRANA RESPIRATORIA

Después de que los alvéolos se hayan ventilado con aire limpios, la siguiente fase de la respiración es la difusión de oxígeno (O_2) desde los alvéolos hacia la sangre pulmonar y la difusión del dióxido de carbono (CO_2) en Dirección opuesta, desde sangre a los alvéolos. El proceso de difusión es solo el movimiento aleatorio de moléculas en todas las direcciones por la membrana respiratoria y líquidos adyacentes. También es importante la velocidad en la que ocurre

FÍSICA DE LA DIFUSIÓN GASEOSA Y PRESIONES PARCIALES DE GASES BASE MOLECULAR DE LA DIFUSIÓN GASEOSA

Todos los gases en ;sio respiratoria se mueven por difusión, al igual que los disueltos en líquidos y tejidos del cuerpo. Para que la difusión suceda, se necesita de energía, que proviene del movimiento cinético de las propias partículas, este es de forma continua excepto en el cero absoluto de temperatura. En el caso de las moléculas que no están unidas a otras, debe haber un movimiento lineal a una velocidad elevada para que choquen con otras, rebotando en direcciones nuevas y chocando de nuevo con otras moléculas, por lo que se mueven de forma rápida y aleatoria entre sí.

Difusión neta de un gas en una dirección: efecto de un gradiente de concentración
Si hay una elevada concentración de gas en un extremo y una concentración baja en el otro, se produce una difusión neta del gas de la zona elevada a la baja, ya que hay más moléculas en el extremo A que pueden difundir al B que en dirección opuesta, por lo que las velocidades de difusión son diferentes proporcionalmente

PRESIONES GASEOSAS EN UNA MEZCLA DE GASES:

<presiones parciales> de gases individuales La presión está producida por los impactos de las partículas en contra la superficie. Por lo tanto, la presión de un gas que actúa sobre las superficies de las vías aéreas y alveolos es proporcional a la suma de la fuerza de los impactos de todas las moléculas de ese gas que chocan contra la superficie en un momento dado Presión es directamente proporcional a la concentración de moléculas de gas". Los gases que se usan son oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono. La velocidad de difusión de cada uno es directamente proporcional a la presión que genera el gas solo (Presión parcial de ese gas). Por ejemplo, el aire tiene una composición de 79% nitrógeno (600mmHg) y 21% oxígeno (160mmHg) y la presión total de la mezcla es de 760 mmHg (la suma de las presiones parciales individuales).

PRESIONES DE GASES DISUELTOS EN AGUA Y TEJIDOS

Estos también ejercen presión, también se mueven aleatoriamente y tienen energía cinética. Cuando este gas disuelto en líquido entra en contacto con una superficie como la membrana de una célula, ejerce su presión parcial al igual que uno en su fase gaseosa. Los gases se denominan igual que en estado gaseoso: P_{O_2} , P_{CO_2} , P_{N_2} , P_{He} .

Factores que determinan la presión parcial de un gas disuelto en un líquido

La presión parcial de gas en una solución está determinada por su concentración y el coeficiente de solubilidad del gas. Algunas moléculas son

atraídas física o químicamente por moléculas de agua, las cuales se disuelven más sin generar un exceso de presión parcial al interior de la solución y otras son repelidas, por lo que se genera una presión elevada con menos moléculas disueltas.

Ley de Henry: Presión parcial = Concentración de gas disuelto / Coeficiente de solubilidad.

Cuando la presión parcial se expresa en atmósferas (1 presión de 1 atmósfera = 760 mmHg) y la concentración se expresa en volumen de gas disuelto en cada volumen de agua, los coeficientes de solubilidad de gases respiratorios a temperatura corporal son: Con lo que podemos ver que el CO₂ es 20 veces más soluble que el O₂. Por lo que la presión parcial de CO₂ es menor de 1/20 de la que ejerce el O₂. Difusión de gases entre la fase gaseosa de los alvéolos y la fase disuelta de la sangre pulmonar. La presión parcial de cada uno de los gases en la mezcla de gas respiratorio alveolar tiene a hacer que las moléculas de ese gas se disuelvan en la sangre de los capilares alveolares. Por el contrario, las moléculas del mismo gas que ya están disueltas en la sangre están rebotando de forma aleatoria en el líquido de la sangre y otras rebotan y escapan de nuevo a los alveolos. La velocidad en la que escapan es directamente proporcional a su presión parcial en la sangre.

La difusión neta está determinada por la diferencia entre las 2 presiones parciales. Si la presión parcial es mayor en la fase gaseosa de los alvéolos, como ocurre con el oxígeno, entonces más difunden hacia la sangre que en la otra dirección. Si la presión parcial del gas es mayor en el estado disuelto en sangre como el CO₂, la difusión neta será hacia la fase gaseosa de los alvéolos.

PRESIÓN DE VAPOR DE AGUA

Cuando se inhala el aire no humidificado hacia las vías aéreas, el agua se evapora de inmediato desde la superficie de estas vías aéreas y humidifica el aire. Ya que las moléculas de agua, se escapan continuamente de la superficie del agua hacia la fase gaseosa. La presión parcial que ejercen, se llama presión de vapor del agua, la cual es de 47 mmHg en 27°C de temperatura corporal. Esta presión se denomina P_{H₂O}. Esta presión depende de la temperatura, cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la actividad cinética de las moléculas y por lo tanto se pueden escapar de la superficie del agua hacia la fase gaseosa.

LA DIFERENCIA DE PRESIÓN PROVOCA DIFUSIÓN DE GASES A TRAVÉS DE LÍQUIDOS

Los gases importantes son muy solubles en lípidos, por lo tanto también en las membranas celulares. Debido a esto, la principal limitación al movimiento de los gases en los tejidos es la velocidad a la que los gases pueden difundir a través del agua tisular, en lugar de a través de las membranas celulares.

LAS COMPOSICIONES DEL AIRE ALVEOLAR Y EL AIRE ATMOSFÉRICO SON DIFERENTES

El aire alveolar no tiene las mismas concentraciones que el atmosférico. La primera razón es que el aire alveolar es sustituido solo de forma parcial por aire atmosférico en cada respiración. Segundo, O₂ se absorbe constantemente hacia la sangre pulmonar desde el aire pulmonar. Tercero, el CO₂ está difundiendo constantemente desde la sangre pulmonar hacia los

alvéolos. Cuarto, el aire atmosférico seco que entra en las vías aéreas es humidificado incluso antes de que llegue a los alvéolos.

HUMIDIFICACION DEL AIRE EN LAS VÍAS AÉREAS

El aire atmosférico entra a las vías aéreas y está expuesto a los líquidos que recubren las superficies respiratorias, incluso antes de que el aire entre a los alveolos, se humidifica casi totalmente. La presión parcial de vapor de agua del aire alveolar es de 47 mmHg. Como la presión total en alveolos no puede aumentar por encima de la atmosférica (760 mmHg), el vapor de agua solo diluye los demás gases que están en el aire inspirado. La humidificación del aire diluye la presión parcial de oxígeno al nivel del mar de un promedio de 159 mmHg en el aire atmosférico a 149 mmHg en el aire humidificado y diluye la presión parcial de nitrógeno desde 597 mmHg a 563 mmHg.

EL AIRE ALVEOLAR SE RENUEVA LENTAMENTE POR EL AIRE ATMOSFERICO

La capacidad residual funcional de los pulmones es de 2,300 ml. Sin embargo solo 350ml de aire nuevo entran en los alvéolos en cada inspiración normal y se espira lo mismo de aire alveolar. Por lo que el volumen de aire alveolar que es sustituido por aire atmosférico nuevo en cada respiración es de solo 1/7 del total, de modo que se necesitan de inspiraciones múltiples para cambiar la mayoría del aire alveolar, de forma lenta (aprox 16).

IMPORTANCIA DE LA SUSTITUCIÓN LENTA DEL AIRE ALVEOLAR

Es importante en la prevención de cambios súbitos de las concentraciones de gases en la sangre, hace que el mecanismo de control respiratorio sea más estable y ayuda a prevenir los aumentos y disminuciones excesivos de oxigenación tisular, de la concentración tisular de CO₂ y del pH tisular cuando hay una interrupción temporal de la respiración.

CONCENTRACIÓN Y PRESION PARCIAL DE OXIGENO EN LOS ALVÉOLOS

El oxígeno se absorbe continuamente desde los alveolos hacia la sangre de los pulmones y continuamente y respira O₂ nuevo hacia los alvéolos desde la atmósfera, cuanto más rápido se absorba, menos habrá en los alveolos, por el contrario, cuanto más rápido se inhale nuevo O₂ hacia los alveolos, mayor será su concentración.

La concentración de O₂ en los alveolos y su presión parcial está controlada por:

- 1) La velocidad de absorción de O₂, hacia la sangre
- 2) La velocidad de entrada de O₂ nuevo a los pulmones por la ventilación.

CONCENTRACIÓN Y PRESIÓN PARCIAL DE CO₂ EN LOS ALVÉOLOS

EL CO₂ se forma continuamente en el cuerpo y se transporta por la sangre a los alveolos y se eliminan con la ventilación. 2 hechos: primero, la Pco₂ alveolar aumenta en proporción directa a la velocidad de excreción de CO₂, como representa la elevación de cuatro veces de la curva (cuando se excretan 800 ml de CO₂ por minuto). Segundo, la Pco₂ alveolar disminuye en proporción inversa a la ventilación alveolar. Por tanto, las concentraciones y las presiones parciales tanto del O₂ como del CO₂ en los alvéolos están determinadas por las velocidades de absorción o excreción de los dos gases y por la magnitud de la ventilación alveolar

EL AIRE ESPIRADO ES UNA COMBINACIÓN DE AIRE DEL ESPACIO MUERTO Y AIRE ALVEOLAR

La composición global del aire espirado está determinado por:

- 1) La cantidad de aire espirado que es aire del espacio muerto.
- 2) La cantidad que es aire alveolar.

Modificaciones progresivas de las presiones parciales de O₂ y CO₂, en el aire espirado durante el transcurso de la espiración. La primera porción de este aire, el aire del espacio muerto de las vías aéreas respiratorias, es humidificado. Después más aire alveolar se mezcla con el aire del espacio muerto hasta que se ha eliminado el aire del espacio muerto y solo se espira aire alveolar. El aire espirado normal que contiene ambos (aire del espacio muerto y alveolar) tiene concentraciones y presiones parciales de gases.

DIFUSIÓN DE GASES A TRAVÉS DE LA MEMBRANA RESPIRATORIA

Unidad respiratoria (Lobulillo respiratorio) Formada por 1 bronquiolo respiratorio, los conductos alveolares, los atrios y los alvéolos. Hay aprox. 300 millones de alveolos en los 2 pulmones y cada alveolo tiene un diámetro aprox de 0,2mm. Las paredes alveolares son muy delgadas y entre los alveolos hay una red casi sólida de capilares interconectados. Se ha dicho que es una lámina de sangre que vuela. Por lo que los gases alveolares están muy próximos a la sangre de los capilares pulmonares. El intercambio gaseoso entre el aire alveolar y la sangre pulmonar se produce por las membranas de todas las porciones terminales de los pulmones, no solo en los alveolos. En forma colectiva se denominan MEMBRANA RESPIRATORIA/PULMONAR.

CAPAS Membrana respiratoria En algunas zonas mide 0,2 μ m y en promedio es de 0,6 μ m. La superficie total es de 70m² en el adulto sano.

La cantidad total de sangre en los capilares de pulmones es de 60-140 ml. El diámetro de los capilares es de 5 μ m, lo que significa que los eritrocitos se comprimen a través de ellos. La membrana del eritrocito toca la pared capilar, por lo que no es necesario que el O₂ y CO₂ atraviesen grandes cantidades de plasma para su difusión, por lo que es más rápida.

que tapiza el alvéolo, lo que reduce la tensión superficial del líquido alveolar.

células epiteliales delgadas.

alveolar y la membrana capilar.

casos se fusiona con la membrana basal del epitelio alveolar

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VELOCIDAD DE DIFUSIÓN GASEOSA A TRAVÉS DE LA MEMBRANA RESPIRATORIA

Los factores que determinan la rapidez con la que un gas atraviesa la membrana son:

sustancia de la membrana

entre los dos lados de la membrana.

De forma ocasional se produce un aumento del grosor de la membrana respiratoria, como consecuencia de la presencia de líquido de edema en el espacio intersticial de la membrana y en los alveolos, de forma que los gases respiratorios deben difundir por la membrana y por el líquido.

