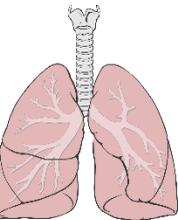


# VENTILACION PULMONAR



## 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
- 2) mediante la elevación y el descenso de las costillas para aumentar y reducir el diámetro anteroposterior de la cavidad torácica

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.
- 3) los escalenos, que elevan las dos primeras costillas.

Los músculos que tiran hacia abajo de la caja costal durante la espiración son principalmente

- 1) los rectos del abdomen, que tienen el potente efecto de empujar hacia abajo las costillas inferiores al mismo tiempo que ellos y otros músculos abdominales
- 2) los intercostales internos.

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

### 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. La presión pleural normal al comienzo de la inspiración es de aproximadamente  $-5$  cmH<sub>2</sub>O

La inspiración normal, la expansión de la caja torácica tira hacia fuera de los pulmones con más fuerza y genera una presión más negativa, hasta un promedio de aproximadamente  $-7,5$  cmH<sub>2</sub>O

### Presión alveolar

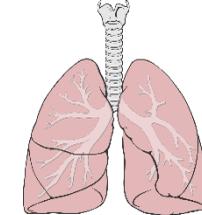
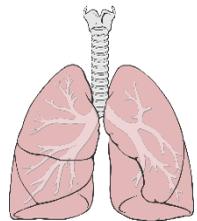
Para que se produzca un movimiento de entrada de aire hacia los alvéolos durante la inspiración, la presión en los alvéolos debe disminuir hasta un valor ligeramente inferior a la presión atmosférica (debajo de cero).

### Presión transpulmonar

la presión transpulmonar es la diferencia entre la presión que hay en el interior de los alvéolos y la que hay en las superficies externas de los pulmones (presión pleural)



# VENTILACION PULMONAR



## Distensibilidad de los pulmones

### Diagrama de distensibilidad de los pulmones

Las características del diagrama de distensibilidad están determinadas por las fuerzas elásticas de los pulmones. Estas se pueden dividir en dos partes:

- 1) fuerzas elásticas del tejido pulmonar en sí mismo.
- 2) fuerzas elásticas producidas por la tensión superficial del líquido que tapiza las paredes internas de los alvéolos y de otros espacios aéreos pulmonares.

Las fuerzas elásticas del tejido pulmonar están determinadas principalmente por las fibras de elastina y colágeno que están entrelazadas entre sí en el parénquima pulmonar. Las fuerzas elásticas que produce la tensión superficial son mucho más complejas.

## Surfactante, tensión superficial y colapso de los alvéolos

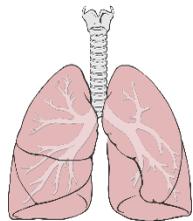
### El surfactante y su efecto sobre la tensión superficial

El surfactante es un agente activo de superficie en agua, lo que significa que reduce mucho la tensión superficial del agua. 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

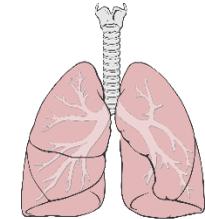
### Distensibilidad del tórax y de los pulmones en conjunto

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 medir la distensibilidad se introduce aire en los pulmones poco a poco mientras se registran las presiones y volúmenes pulmonares





# VENTILACION PULMONAR



## Volúmenes y capacidades pulmonares

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

### Volúmenes pulmonares

### Capacidades pulmonares

### El volumen respiratorio minuto equivale a la frecuencia respiratoria multiplicada por el volumen corriente

### Ventilación alveolar

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.

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
3. La capacidad vital es igual al volumen de reserva inspiratoria más el volumen corriente más el volumen de reserva espiratoria (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.

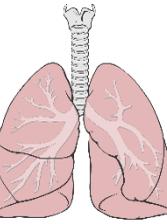
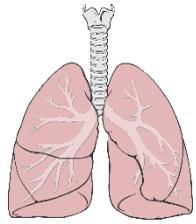
El volumen respiratorio minuto es la cantidad total de aire nuevo que pasa hacia las vías aéreas en cada minuto y es igual al volumen corriente multiplicado por la frecuencia respiratoria por minuto.

El volumen corriente normal es de aproximadamente 500 ml y la frecuencia respiratoria normal es de aproximadamente 12 respiraciones por minuto

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

Parte del aire que respira una persona nunca llega a las zonas de intercambio gaseoso, sino que simplemente llena las vías aéreas en las que no se produce intercambio gaseoso, como la nariz, la faringe y la tráquea





# Circulación pulmonar, edema pulmonar, líquido pleural

## 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.

### 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

### 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

## Presiones en el sistema pulmonar

### 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.

Sin embargo, 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

### Presión capilar pulmonar

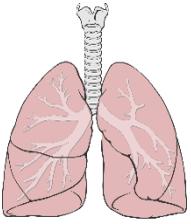
La presión capilar pulmonar media, es de aproximadamente 7 mmHg

### Presiones auricular izquierda y venosa pulmonar

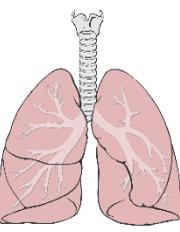
La presión media en la aurícula izquierda y en las venas pulmonares principales es en promedio de aproximadamente 2 mmHg en el ser humano en decúbito, y varía desde un valor tan bajo como 1 mmHg hasta uno tan elevado como 5 mmHg

La presión que se mide a través del catéter, denominada «presión de enclavamiento», es de aproximadamente 5 mmHg.





## Circulación pulmonar, edema pulmonar, líquido pleural



### Volumen sanguíneo de los pulmones

Los pulmones sirven como reservorio de sangre

La patología cardíaca puede desplazar sangre desde la circulación sistémica a la circulación pulmonar

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. Por ejemplo, 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

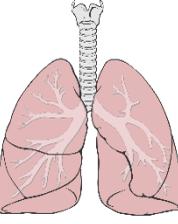
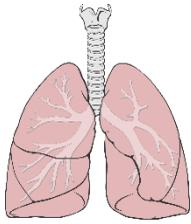
La insuficiencia del lado izquierdo del corazón o el aumento de la resistencia al flujo sanguíneo a través de la válvula mitral como consecuencia de una estenosis mitral o una insuficiencia mitral hace que la sangre quede estancada en la circulación pulmonar, aumentando a veces el volumen de sangre pulmonar hasta un 100% y produciendo grandes aumentos de las presiones vasculares pulmonares.

### Flujo sanguíneo a través de los pulmones y su distribución

Cuando la concentración de O<sub>2</sub> 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 Po<sub>2</sub>]) los vasos sanguíneos adyacentes se constriñen, con un aumento de la resistencia vascular de más de cinco veces a concentraciones de O<sub>2</sub> 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 O<sub>2</sub>.





## Circulación pulmonar, edema pulmonar, líquido pleural

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

la presión arterial en el pie de una persona que está de pie puede ser hasta 90 mmHg mayor que la presión a nivel del corazón

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.

### 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

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.

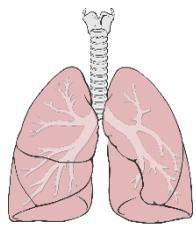
Zona 3: flujo de sangre continuo, porque la presión capilar alveolar es mayor que la presión del aire alveolar durante todo el ciclo cardíaco

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

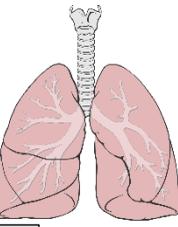
### El flujo sanguíneo de zona 1 solo se produce en situaciones anormales

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





# Circulación pulmonar, edema pulmonar, líquido pleural



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

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

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.
- 3) aumentando la presión arterial pulmonar

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.

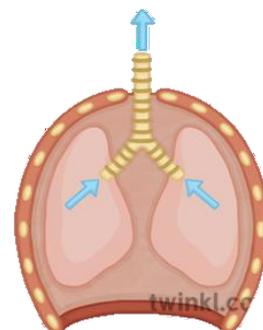
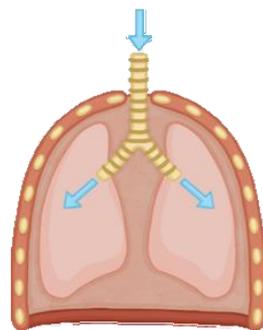
## Dinámica capilar pulmonar

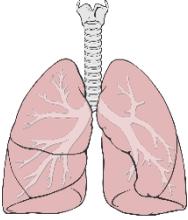
Presión capilar pulmonar

Duración del tiempo que la sangre permanece en los capilares pulmonares

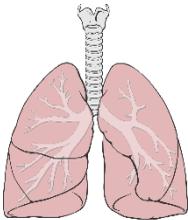
Nunca se han realizado mediciones directas de la presión capilar pulmonar. Sin embargo, el método isogravimétrico de la presión capilar pulmonar, utilizando es una técnica que, ha dado un valor de 7 mmHg

A partir del estudio histológico del área transversal total de todos los capilares pulmonares se puede calcular que cuando el gasto cardíaco es normal la sangre pasa a través de los capilares pulmonares en aproximadamente 0,8 s.





## Circulación pulmonar, edema pulmonar, líquido pleural



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

1. La presión capilar pulmonar es baja, de aproximadamente 7 mmHg, en comparación con una 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

3. La presión coloidsmótica 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

### 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 mucoide entre las pleuras parietal y visceral

La cantidad total de líquido en cada una de las cavidades pleurales normalmente es pequeña, solo de algunos mililitros

el exceso de líquido es extraído mediante bombeo por los vasos linfáticos que se abren directamente desde la cavidad pleural hacia:

- 1) el mediastino
- 2) la superficie superior del diafragma
- 3) las superficies laterales de la pleura parietal

### Presión negativa en el líquido pleural

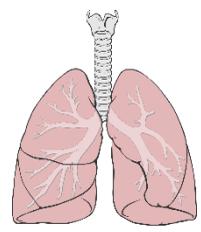
Siempre es necesaria una fuerza negativa en el exterior de los pulmones para mantener expandidos los pulmones.

Esta fuerza es proporcionada por la presión negativa del espacio pleural normal

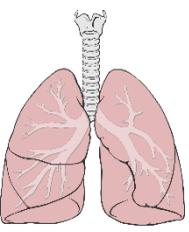
### Derrame pleural: acumulación de grandes cantidades de líquido libre en el espacio pleural

El derrame es análogo al líquido de edema en los tejidos y se puede denominar edema de la cavidad pleural

- 1) bloqueo del drenaje linfático desde la cavidad pleural.
- 2) insuficiencia cardíaca, que da lugar a unas presiones capilares periférica y pulmonar excesivamente altas, que dan lugar a una trasudación excesiva de líquido hacia la cavidad pleural.
- 3) marcada reducción de la presión osmótica coloidal del plasma, que permite una trasudación excesiva de líquidos.
- 4) infección o cualquier otra causa de inflamación de las superficies de la cavidad pleura.



# Principios físicos del intercambio gaseoso; difusión de oxígeno y dióxido de carbono a través de la membrana respiratorias



La valoración de zona de influencia es simplemente el movimiento casual de moléculas en todas las direcciones a través de la membrana respiratoria y los líquidos adyacentes

## Las composiciones del aire alveolar y el aire atmosférico son diferentes

Hay varias razones para estas diferencias. Primero, el aire alveolar es sustituido solo de manera parcial por aire atmosférico en cada respiración. Segundo, el O<sub>2</sub> se absorbe constantemente hacia la sangre pulmonar desde el aire pulmonar

## Humidificación del aire en las vías aéreas

La presión parcial de vapor de agua a una temperatura corporal normal de 37 °C es de 47 mmHg, que es, por tanto, la presión parcial de vapor de agua del aire alveolar. Como la presión total en los alvéolos no puede aumentar por encima de la presión atmosférica (760 mmHg a nivel del mar), este vapor de agua simplemente diluye todos los demás gases que están en el aire inspirado.

## El aire alveolar se renueva lentamente por el aire atmosférico

la capacidad residual funcional de los pulmones (el volumen de aire que queda en los pulmones al final de una espiración normal) en un hombre mide aproximadamente 2.300 ml.

Sin embargo, solo 350 ml de aire nuevo entran en los alvéolos en cada inspiración normal y se espira esta misma cantidad de aire alveolar

## Concentración y presión parcial de oxígeno en los alvéolos

Por tanto, la concentración de O<sub>2</sub> en los alvéolos, y también su presión parcial, está controlada por

- 1) la velocidad de absorción de O<sub>2</sub> hacia la sangre
- 2) la velocidad de entrada de O<sub>2</sub> nuevo a los pulmones por el proceso ventilatorio.

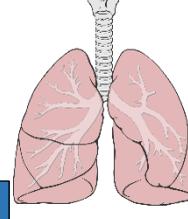
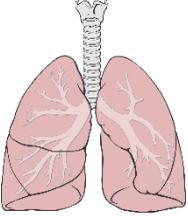
## Concentración y presión parcial de CO<sub>2</sub> en los alvéolos

El dióxido de carbono se forma continuamente en el cuerpo y después se transporta por la sangre hacia los alvéolos; se elimina continuamente de los alvéolos por la ventilación

## Difusión de gases a través de la membrana respiratoria

### Membrana respiratoria

1. Una capa de líquido que contiene surfactante y que tapiza el alvéolo, lo que reduce la tensión superficial del líquido alveolar.
2. El epitelio alveolar, que está formado por células epiteliales delgadas.
3. Una membrana basal epitelial.
4. Un espacio intersticial delgado entre el epitelio alveolar y la membrana capilar.
5. Una membrana basal capilar que en muchos casos se fusiona con la membrana basal del epitelio alveolar.
6. La membrana del endotelio capilar.



## Principios físicos del intercambio gaseoso; difusión de oxígeno y dióxido de carbono a través de la membrana respiratorias

### Capacidad de difusión de la membrana respiratoria

Su capacidad de la membrana respiratoria de intercambiar un gas entre los alvéolos y la sangre pulmonar se expresa principalmente en términos cuantitativos por la capacidad de difusión de la membrana respiratoria, que se define como el volumen de un gas que difunde a través de la membrana en cada minuto para una diferencia de presión parcial de 1 mmHg

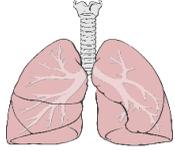
### Aumento de la capacidad de difusión del oxígeno durante el ejercicio

Este aumento está producido por varios factores, entre los que se encuentran principalmente se dividen en 2

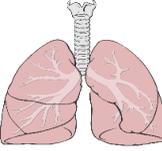
- 1) la apertura de muchos capilares pulmonares previamente cerrados o la dilatación adicional de capilares ya abiertos, aumentando de esta manera el área superficial de la sangre hacia la que puede difundir el O<sub>2</sub>
- 2) un mejor equilibrio entre la ventilación de los alvéolos y la perfusión de los capilares alveolares con sangre, denominado cociente de ventilación-perfusión

### Capacidad de difusión del dióxido de carbono

las mediciones de la difusión de otros gases han mostrado que la capacidad de difusión varía directamente con el coeficiente de difusión del gas particular. Como el coeficiente de difusión del CO<sub>2</sub> es algo mayor de 20 veces el del O<sub>2</sub>, cabe esperar que la capacidad de difusión del CO<sub>2</sub> en reposo sea de aproximadamente 400 a 450 ml/min/mmHg



## Transporte de oxígeno y dióxido de carbono en la sangre y los líquidos tisulares



En las células de los tejidos corporales el O<sub>2</sub> reacciona con varios nutrientes para formar grandes cantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Este CO<sub>2</sub> entra en los capilares tisulares y es transportado de nuevo hacia los pulmones. El dióxido de carbono, al igual que el O<sub>2</sub>, también se combina en la sangre con sustancias químicas que aumentan de 15 a 20 veces el transporte del CO<sub>2</sub>

### Transporte de oxígeno de los pulmones a los tejidos del organismo

El O<sub>2</sub> difunde desde los alvéolos hacia la sangre capilar pulmonar porque la presión parcial de oxígeno (Po<sub>2</sub>) en los alvéolos es mayor que la Po<sub>2</sub> en la sangre

capilar pulmonar. En los otros tejidos del cuerpo, una mayor Po<sub>2</sub> en la sangre capilar que en los tejidos hace que el O<sub>2</sub> difunda hacia las células circundantes

Al igual este proceso ocurre pero es lo contrario, cuando el O<sub>2</sub> se ha metabolizado en las células para formar CO<sub>2</sub>, la presión parcial de dióxido de carbono (Pco<sub>2</sub>) intracelular aumenta, lo que hace que el CO<sub>2</sub> difunda hacia los capilares tisulares.

### Difusión de oxígeno de los alvéolos a la sangre capilar pulmonar

La Po<sub>2</sub> del O<sub>2</sub> gaseoso del alvéolo es en promedio de 104 mmHg, mientras que la Po<sub>2</sub> de la sangre venosa que entra en el capilar pulmonar en su extremo arterial es en promedio de solo 40 mmHg

### Captación del oxígeno por la sangre pulmonar durante el ejercicio

Cuando hacemos ejercicio muy intenso el cuerpo de una persona puede precisar hasta 20 veces más oxígeno de lo normal.

Además, debido al aumento del gasto cardíaco durante el ejercicio, el tiempo que la sangre permanece en el capilar pulmonar se puede reducir hasta menos de la mitad de lo normal.

### Transporte de oxígeno en la sangre arterial

El 98% de la sangre que entra en la aurícula izquierda desde los pulmones acaba de atravesar los capilares alveolares y se ha oxigenado hasta una Po<sub>2</sub> de aproximadamente 104 mmHg

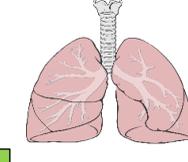
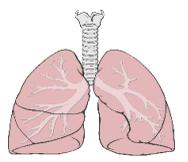
Otro 2% de la sangre ha pasado desde la aorta a través de la circulación bronquial, que vasculariza principalmente los tejidos profundos de los pulmones y no está expuesta al aire pulmonar.

### Difusión de oxígeno de los capilares periféricos al líquido tisular

en el líquido intersticial que rodea las células tisulares es en promedio de solo 40 mmHg.

Así, hay una gran diferencia de presión inicial que hace que el oxígeno difunda rápidamente desde la sangre capilar hacia los tejidos, tan rápidamente que la Po<sub>2</sub> capilar disminuye hasta un valor casi igual a la presión de 40 mmHg que hay en el intersticio

# Transporte de oxígeno y dióxido de carbono en la sangre y los líquidos tisulares



## AUMENTOS DE FLUJOS

aumento del flujo sanguíneo eleva la  $P_{O_2}$  del líquido intersticial

aumento del metabolismo tisular disminuye la  $P_{O_2}$  del líquido intersticial

Si aumenta el flujo sanguíneo que atraviesa un tejido particular, se transportan cantidades mayores de  $O_2$  hacia el tejido y, por tanto, la  $P_{O_2}$  tisular aumenta

En resumen, la  $P_{O_2}$  tisular está determinada por un equilibrio entre:  
1) la velocidad del transporte del  $O_2$  en la sangre hacia los tejidos  
2) la velocidad a la que los tejidos utilizan el  $O_2$ .

## Difusión de oxígeno de los capilares periféricos a las células de los tejidos

El oxígeno está siendo utilizado siempre por las células. Por tanto, la  $P_{O_2}$  intracelular de los tejidos periféricos siempre es más baja que la  $P_{O_2}$  de los capilares periféricos. Además, en muchos casos hay una distancia física considerable entre los capilares y las células

## Difusión de dióxido de carbono de las células de los tejidos

Por tanto, las diferencias de presión necesarias para producir la difusión del  $CO_2$  son, en todos los casos, mucho menores que las diferencias de presión necesarias para producir la difusión del  $O_2$

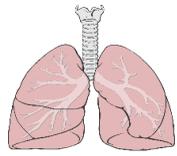
## Función de la hemoglobina en el transporte del oxígeno

En condiciones normales aproximadamente el 97% del oxígeno que se transporta desde los pulmones a los tejidos es transportado en combinación química con la hemoglobina de los eritrocitos

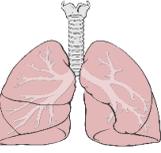
Cantidad de oxígeno que libera la hemoglobina cuando la sangre arterial sistémica fluye a través de los tejidos

cantidad total de  $O_2$  unido a la hemoglobina en la sangre arterial sistémica normal, que tiene una saturación del 97%, es de aproximadamente 19,4 ml por cada 100 ml de sangre

Durante el ejercicio intenso las células musculares utilizan  $O_2$  a una velocidad rápida, que en casos extremos puede hacer que la  $P_{O_2}$  del líquido intersticial disminuya desde los 40 mmHg normales hasta un valor tan bajo como 15 mmHg.



## Transporte de oxígeno y dióxido de carbono en la sangre y los líquidos tisulares



### La hemoglobina amortigua la Po2 tisular

Aunque la hemoglobina es necesaria para el transporte del O2 hacia los tejidos, realiza otra función esencial para la vida, ya que esta es la que ayuda al corazón a darle vida a nuestro cuerpo humano

### La hemoglobina ayuda a mantener una Po2 casi constante en los tejidos

En condiciones basales los tejidos precisan aproximadamente 5 ml de O2 por cada 100 ml de sangre que atraviesan los capilares tisulares. Haciendo referencia de nuevo a la curva de disociación O2- hemoglobina

Por el contrario, durante el ejercicio intenso se deben liberar desde la hemoglobina hacia los tejidos cantidades adicionales de O2 (hasta 20 veces el valor normal). Sin embargo, este suministro de O2 suplementario se puede conseguir con una pequeña disminución adicional de la Po2 tisular debido

A los siguientes pasos

- 1) la pendiente inclinada de la curva de disociación
- 2) el aumento del flujo sanguíneo tisular que produce la reducción de la Po2

Aumento de la liberación de oxígeno hacia los tejidos cuando el dióxido de carbono y los iones hidrógeno desplazan la curva de disociación oxígeno-hemoglobina: el efecto Bohr

cuando la sangre atraviesa los tejidos, el CO2 difunde desde las células tisulares hacia la sangre. Esta difusión aumenta la Pco2 sanguínea, lo que a su vez eleva la concentración sanguínea del H2CO3 (ácido carbónico) y de los iones hidrógeno. Lo contrario en los pulmones, en los que el CO2 difunde desde la sangre hacia los alvéolos. Esta difusión reduce la Pco2 sanguínea y la concentración de iones hidrógeno, desplazando la curva de disociación O2-hemoglobina hacia la izquierda y hacia arriba.

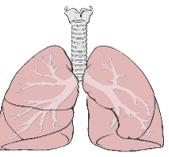
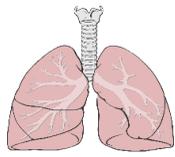
Efecto del BPG para provocar un desplazamiento a la derecha de la curva de disociación oxígeno-hemoglobina

El BPG normal de la sangre mantiene la curva de disociación O2-hemoglobina desplazada ligeramente hacia la derecha todo el tiempo. En situaciones de hipoxia que duran más de varias horas aumenta mucho la cantidad de BPG en la sangre

Desplazamiento a la derecha de la curva de disociación oxígeno-hemoglobina durante el ejercicio

Durante el ejercicio varios factores desplazan la curva de disociación muy a la derecha, liberando de esta manera cantidades adicionales de O2 a las fibras musculares activas que realizan el ejercicio

los músculos aumentan la concentración de iones hidrógeno en la sangre capilar muscular. Además, la temperatura del músculo con frecuencia aumenta de 2 a 3 °C, lo que puede aumentar aún más la liberación de O2 hacia las fibras musculares



**Transporte de oxígeno y dióxido de carbono en la sangre y los líquidos tisulares**

**Efectos que ocurren en el oxígeno**

**Transporte del dióxido de carbono en la sangre**

**Efecto de la distancia de difusión desde el capilar a la célula sobre la utilización de oxígeno**

**Efecto del flujo sanguíneo sobre la utilización metabólica del oxígeno**

El transporte de CO<sub>2</sub> por la sangre no es en absoluto tan problemático como el transporte del O<sub>2</sub> porque incluso en las condiciones más anormales habitualmente se puede transportar el CO<sub>2</sub> en cantidades mucho mayores que el O<sub>2</sub>

Las células de los tejidos raras veces están a más de 50 µm de un capilar, y el O<sub>2</sub> normalmente puede difundir con suficiente facilidad desde el capilar a la célula para proporcionar la cantidad necesaria de O<sub>2</sub> para el metabolismo

La cantidad total de O<sub>2</sub> disponible cada minuto para su utilización en cualquier tejido dado está determinada por:

- 1) la cantidad de O<sub>2</sub> que se puede transportar al tejido por cada 100 ml de sangre
- 2) la velocidad del flujo sanguíneo

**Transporte del dióxido de carbono en forma de ion bicarbonato**

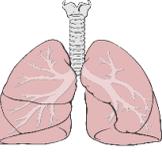
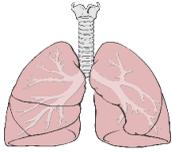
El CO<sub>2</sub> disuelto en la sangre reacciona con el agua para formar ácido carbónico. Esta reacción ocurriría con demasiada lentitud para ser importante de no ser por el hecho de que en el interior de los eritrocitos hay una enzima proteica denominada anhidrasa carbónica, que cataliza la reacción entre el CO<sub>2</sub> y el agua y acelera su velocidad de reacción aproximadamente 5.000 veces.

**Transporte del dióxido de carbono**

**Disociación del ácido carbónico en iones bicarbonato e hidrógeno**

En otra fracción de segundo, el ácido carbónico que se ha formado en los eritrocitos (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) se disocia en iones hidrógeno y bicarbonato (H<sup>+</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

Una pequeña cantidad de CO<sub>2</sub> también reacciona de la misma forma con las proteínas plasmáticas en los capilares tisulares. Esta reacción es mucho menos importante para el transporte del CO<sub>2</sub> porque la cantidad de estas proteínas en la sangre es solo la cuarta parte de la cantidad de la hemoglobina.



# Regulación de la respiración

## Centro respiratorio

El centro respiratorio está formado por varios grupos de neuronas localizadas bilateralmente en el bulbo raquídeo

Las cuales son las siguientes

- 1) un grupo respiratorio dorsal
- 2) un grupo respiratorio ventral
- 3) centro neumotáxico

## Grupo respiratorio dorsal de neuronas: control de la inspiración y del ritmo respiratorio

Descargas inspiratorias rítmicas desde el grupo respiratorio dorsal

El ritmo básico de la respiración se genera principalmente en el grupo respiratorio dorsal de neuronas.

este grupo de neuronas sigue emitiendo descargas repetitivas de potenciales de acción neuronales inspiratorios.

Se desconoce la causa básica de estas descargas repetitivas

Señal en rampa inspiratoria

La señal nerviosa que se transmite a los músculos respiratorios, principalmente el diafragma, no es una descarga instantánea de potenciales de acción

Se controlan dos características de la rampa inspiratoria, como se señala a continuación

1. Control de la velocidad de aumento de la señal en rampa
2. Control del punto limitante en el que se interrumpe súbitamente la rampa, que es el método habitual para controlar la frecuencia de la respiración

## Un centro neumotáxico limita la duración de la inspiración y aumenta la frecuencia respiratoria

centro neumotáxico, localizado dorsalmente en el núcleo parabraquial de la parte superior de la protuberancia, transmite señales hacia la zona inspiratoria.

Su efecto principal de este centro es controlar el punto de desconexión de la rampa inspiratoria, controlando de esta manera la duración de la fase de llenado del ciclo pulmonar

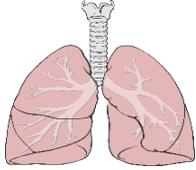
Grupo respiratorio ventral de neuronas: funciones en la inspiración y la espiración

1. Las neuronas del grupo respiratorio ventral permanecen casi totalmente inactivas durante la respiración tranquila normal.
2. . Las neuronas respiratorias no parecen participar en la oscilación rítmica básica que controla la respiración
3. . Cuando el impulso respiratorio para aumentar la ventilación pulmonar se hace mayor de lo normal
4. La estimulación eléctrica de algunas de las neuronas de grupo ventral produce la inspiración, mientras que la estimulación de otras produce la espiración

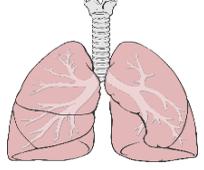
## Las señales de insuflación pulmonar limitan la inspiración: el reflejo de insuflación de Hering-Breuer

Los receptores más importantes, que están localizados en las porciones musculares de las paredes de los bronquios y de los bronquíolos, son los receptores de distensión, que transmiten señales a través de los vagos hacia el grupo respiratorio dorsal de neuronas cuando los pulmones están sobredistendidos

cuando los pulmones se insuflan excesivamente, los receptores de distensión activan una respuesta de retroalimentación adecuada que «desconecta» la rampa inspiratoria y de esta manera interrumpe la inspiración adicional. Este mecanismo se denomina reflejo de insuflación de Hering-Breuer.



## Regulación de la respiración



### Control químico de la respiración

El objetivo último de la respiración es mantener concentraciones adecuadas de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e iones hidrógeno en los tejidos. Por tanto, es afortunado que la actividad respiratoria responda muy bien a las modificaciones de cada una de estas sustancias.

Control químico directo de la actividad del centro respiratorio por el CO<sub>2</sub> y los iones hidrógeno

Se han analizado principalmente tres zonas del centro respiratorio: el grupo respiratorio dorsal de neuronas, el grupo respiratorio ventral y el centro neumotáxico. Se piensa que ninguna de estas zonas se afecta directamente por las alteraciones de la concentración sanguínea de CO<sub>2</sub> ni por la concentración de iones hidrógeno

Es probable que la excitación de las neuronas quimiosensibles por los iones hidrógeno sea el estímulo primario

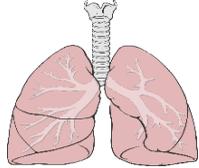
Las neuronas detectoras de la zona quimiosensible son excitadas especialmente por los iones hidrógeno; de hecho, se piensa que los iones hidrógeno pueden ser el único estímulo directo importante de estas neuronas. Sin embargo, los iones hidrógeno no atraviesan fácilmente la barrera hematoencefálica

### El CO<sub>2</sub> estimula la zona quimiosensible

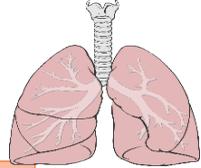
Aunque el CO<sub>2</sub> tiene poco efecto directo en la estimulación de las neuronas de la zona quimiosensible, tiene un efecto indirecto potente. Consigue este efecto reaccionando con el agua de los tejidos para formar ácido carbónico, que se disocia en iones hidrógeno y bicarbonato; después, los iones hidrógeno tienen un efecto estimulador directo potente sobre la respiración

Disminución del efecto estimulador del CO<sub>2</sub> después de los primeros 1 a 2 días

La excitación del centro respiratorio por el CO<sub>2</sub> es intensa en las primeras horas después de la primera elevación del CO<sub>2</sub> sanguíneo, aunque después disminuye gradualmente a lo largo de los 1 a 2 días siguientes, disminuyendo hasta aproximadamente 1/5 del efecto inicial



# Regulación de la respiración



## Sistema de quimiorreceptores periféricos para controlar la actividad respiratoria: función del oxígeno en el control respiratorio

Hay receptores químicos nerviosos especiales, denominados quimiorreceptores, en varias zonas fuera del encéfalo. Son especialmente importantes para detectar modificaciones del O<sub>2</sub> de la sangre, aunque también responden en menor grado a modificaciones de las concentraciones de CO<sub>2</sub> y de iones hidrógeno

Los cuerpos carotídeos están localizados bilateralmente en las bifurcaciones de las arterias carótidas comunes. Sus fibras aferentes pasan a través de los nervios de Hering hacia los nervios glosofaríngeos y posteriormente a la zona respiratoria dorsal del bulbo raquídeo

### La disminución del oxígeno arterial estimula a los quimiorreceptores

Cuando la concentración de oxígeno en la sangre arterial disminuye por debajo de lo normal se produce una intensa estimulación de los quimiorreceptores.

### El aumento de la concentración de dióxido de carbono e iones hidrógeno estimula a los quimiorreceptores

Un aumento tanto de la concentración de CO<sub>2</sub> como de la concentración de iones hidrógeno también excita los quimiorreceptores y de esta manera aumenta indirectamente la actividad respiratoria. Sin embargo, los efectos directos de estos dos factores sobre el propio centro respiratorio son mucho más potentes que los efectos mediados a través de los quimiorreceptores (aproximadamente siete veces más potentes).

## Mecanismo básico de estimulación de los quimiorreceptores por la deficiencia de O<sub>2</sub>

Todavía se desconoce completamente el mecanismo exacto por el que una Po<sub>2</sub> baja excita las terminaciones nerviosas de los cuerpos carotídeos y aórticos.

Sin embargo, estos cuerpos tienen muchas células muy características de aspecto glandular, denominadas células glómicas, que establecen sinapsis directa o indirectamente con las terminaciones nerviosas

### La respiración crónica de cantidades bajas de oxígeno estimula aún más la respiración: el fenómeno de aclimatación

Los escaladores han observado que cuando ascienden lentamente una montaña, a lo largo de un período de días y no de un período de horas, respiran con una profundidad mucho mayor y, por tanto, pueden soportar concentraciones atmosféricas de O<sub>2</sub> mucho menores que cuando ascienden rápidamente. Este fenómeno se denomina aclimatación

## Regulación de la respiración durante el ejercicio

Interrelación entre factores químicos y nerviosos: factores del control de la respiración durante el ejercicio

Cuando una persona realiza un ejercicio, es probable que señales nerviosas directas estimulen el centro respiratorio casi en la misma magnitud para aportar el oxígeno adicional necesario para realizar el ejercicio y para eliminar el CO<sub>2</sub> adicional. Sin embargo, de manera ocasional las señales nerviosas de control respiratorio son demasiado intensas o demasiado débiles