

Tema 9: Ventilación pulmonar. Intercambio y transporte gaseoso

Introducción al sistema respiratorio

La respiración es el intercambio de gases entre las células del organismo y el ambiente. En el metabolismo se toma oxígeno del ambiente y se expulsa dióxido de carbono. El proceso final por el que la mayor parte de los animales obtienen su O₂ y pierden CO₂ es la **difusión**, en donde hay un movimiento de moléculas siguiendo gradientes de concentración. Sin embargo este tipo de transporte es muy lento para distancias grandes, por lo que se necesita un sistema de transporte rápido para mover con eficacia los gases entre los tejidos y el exterior: disponemos de un sistema respiratorio especializado, en unión de un sistema circulatorio.

El **sistema respiratorio** de la especie humana consta de a) un sistema de conducción (conductos aéreos) y b) una interfase, en donde se produce el intercambio de gases, atmósfera/sangre. Está formado por los **pulmones**, en los cuales el movimiento de los gases tiene lugar gracias a la acción de fuelle de las paredes del tórax y diafragma, que crea una presión negativa que atrae aire a su interior. Debido a que el volumen de gases que necesitamos intercambiar es muy grande, los pulmones tienen una gran superficie interna (unos 160 m² de superficie de difusión), que se consigue gracias a la existencia de millones de pequeños espacios aéreos: los **alvéolos**.

El aire se filtra a través de los pelos de la **nariz**, que retienen las grandes partículas de polvo, y se humedece y calienta en la **mucosa nasal** y en la **faringe**, de modo que cuando alcanza la **tráquea** está saturado de vapor de agua y a la temperatura del organismo. La tráquea se divide en las ramas derecha e izquierda y continúa ramificándose en **bronquios** cada vez más pequeños, hasta llegar a los **bronquiolos terminales**, que conducen a los **alvéolos**. Los alvéolos son estructuras de pared fina revestidos por los capilares pulmonares, tienen un diámetro de 100-300 µm y en ellos tiene lugar el intercambio entre O₂ y CO₂. Los gases tienen que atravesar varios tipos de tejido: 1) endotelio capilar; 2) células epiteliales denominadas neumocitos. Los neumocitos de tipo II secretan surfactante, una lipoproteína que estabiliza los alvéolos (es tensioactivo: reduce la tensión superficial) e impide que se colapsen; y 3) una membrana basal de tejido conjuntivo. El flujo sanguíneo es de unos 5 l/min en reposo y unos 20-30 l/min durante el ejercicio. Por su parte, el flujo de aire es de unos 4 l/min en reposo y de unos 100 l/min durante el ejercicio.

La sangre llega a los pulmones para oxigenarse a través de la **circulación pulmonar**. El ventrículo derecho bombea la sangre a través de la arteria pulmonar hasta los pulmones, en donde se producen ramificaciones que dan lugar, en los alvéolos, a los **capilares pulmonares**. La principal diferencia entre la circulación pulmonar y la sistémica es que se trata de un sistema de baja presión, con una presión sistólica/diastólica de 25/10 mmHg.

Mecánica de la ventilación pulmonar

La ventilación es la renovación del aire alveolar. El aire entra y sale de los pulmones como resultado de los cambios de presión en el interior de la cavidad torácica; los cambios de volumen de los pulmones son pasivos.

La **energía** para estos cambios proviene de las contracciones de:

- **diafragma**, en la base de la cavidad torácica.
- músculos de la pared del tórax, principalmente los **intercostales externos e internos**, y también los escalenos y el esternocleidomastoideo.

Los pulmones, por el contrario, tienen tendencia a colapsarse.

En cada **inspiración** se produce la contracción del diafragma e intercostales externos; debido a la forma en que las costillas están articuladas, se origina un aumento en la anchura y en la distancia antero-posterior de la caja torácica. Al final de la inspiración cesa la actividad nerviosa que activa los músculos y el tamaño de la caja torácica disminuye, debido a la elasticidad de los pulmones, que los impulsa a colapsarse; se produce así la **espiración**, que en condiciones normales es un proceso pasivo. Durante la respiración vigorosa se produce también una espiración activa, en la que están implicados diversos músculos torácicos y abdominales.

En la mecánica respiratoria hay que tener en cuenta varias presiones:

- **presión intrapleural.** Las pleuras visceral y parietal cubren las superficies de los pulmones y de la cavidad torácica respectivamente, y forman entre ellas el **espacio pleural**. Estas capas están separadas por una fina película de líquido pleural.
- **presión intrapulmonar**, que es la presión en el interior de un conducto aéreo. Existe un gradiente de presión entre la boca y los alvéolos, siendo la presión alveolar la más negativa durante la inspiración.
- **presión atmosférica**, que es el nivel de referencia con el que se comparan las demás.

El efecto del esfuerzo inspiratorio es reducir la presión intrapleural, lo que produce una reducción de la presión alveolar e induce el flujo de gas. El aire circula a través de los conductos aéreos debido a que hay una diferencia de presión entre los alvéolos y la atmósfera.

Volúmenes y capacidades pulmonares

La actividad pulmonar maneja distintos volúmenes de aire, dependiendo de las necesidades. Se habla de capacidad cuando se suman varios volúmenes.

La capacidad total de los pulmones de una persona de 30 años y 70 kg de peso es de unos 6 litros, y está dividida en varios volúmenes y capacidades:

- volumen residual, que es de aproximadamente 1 l.
- volumen basal, que es de unos 500 ml.
- volumen inspiratorio de reserva.
- volumen espiratorio de reserva.
- capacidad vital, que es la suma de los tres volúmenes anteriores.
- capacidad total.

Espacio muerto respiratorio

Debido a que los alvéolos están situados en el interior del organismo al final de los conductos respiratorios, no todo el aire inspirado llega hasta ellos. Estos conductos de paso constituyen el **espacio muerto anatómico** del sistema respiratorio. Normalmente el volumen de este espacio muerto es de unos 150 ml, casi un tercio del volumen basal. El **espacio muerto total o fisiológico** incluye además al gas que ventila los alvéolos con una irrigación sanguínea pobre o nula (en condiciones normales, no todos los capilares están perfundidos, sino que algunos están cerrados debido a la baja presión; si aumenta el flujo de sangre, también aumentará la presión y entonces los vasos colapsados se abren –reclutamiento capilar-).

Ventilación alveolar

El volumen de aire que entra a los alvéolos por minuto y que produce una ventilación efectiva es, por lo tanto:

$$\text{frecuencia respiratoria} \times (\text{volumen basal} - \text{espacio muerto fisiológico})$$

Esta es la **ventilación alveolar**, y varía desde unos 4 litros/min en reposo hasta 100 litros/min en el ejercicio intenso.

Intercambio y transporte gaseoso

Difusión de los gases respiratorios en el organismo

Intercambio entre los alvéolos y la sangre

El movimiento de O₂ y CO₂ entre los alvéolos y la sangre está determinado por las diferencias de presión parcial (equivalente a la concentración; normalmente se usa la presión parcial como medida de la concentración molar del gas). El CO₂ difunde con una rapidez que es unas 20 veces mayor que la del oxígeno, por lo que le bastan diferencias de presión parcial pequeñas. El camino a recorrer entre el aire alveolar y la sangre es muy corto; y en las partes más finas está formado por tres componentes:

- el **epitelio alveolar**: formado por células denominadas **neumocitos**.
- la **membrana basal**.
- el **endotelio** del capilar.

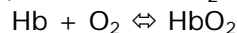
El O₂ y CO₂ difunden en direcciones opuestas, tanto en los pulmones como en los capilares sistémicos.

Intercambio entre la sangre y los tejidos

Al igual que en los pulmones, la difusión depende de la diferencia de presión parcial.

Transporte de O₂ por la sangre

El principal responsable del transporte de O₂ es la **hemoglobina** que se encuentra en el interior de los eritrocitos. La hemoglobina se combina reversiblemente con el oxígeno, y de esta manera se transporta más del 98 % del oxígeno que existe en la sangre; el resto del O₂ se encuentra disuelto en la sangre.



Cuando la Po₂ es alta, como en los capilares pulmonares, la reacción está desplazada hacia la derecha y el O₂ se liga a la hemoglobina; cuando la Po₂ es baja, como en los capilares tisulares, la reacción se desplaza hacia la izquierda y el oxígeno se libera de su unión.

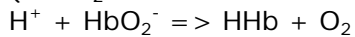
La unión química entre la Hb y el O₂ tiene varias características:

- es una combinación reversible; la forma unida al oxígeno se denomina **oxihemoglobina (HbO₂)**.
- la reacción del O₂ con la Hb es muy rápida, lo que es importante para el transporte ya que la sangre permanece en los capilares pulmonares y sistémicos menos de un segundo.

La relación entre la presión parcial de O₂ (Po₂) y el porcentaje de saturación de la Hb (porcentaje de unión del oxígeno con la hemoglobina) se denomina **curva de disociación de la hemoglobina** (o curva de equilibrio de la HbO₂). Esta curva nos indica que a nivel alveolar, en donde la Po₂ es de unos 100 mmHg, toda la hemoglobina se encuentra en niveles de saturación. Por el contrario, a los niveles de Po₂ en los tejidos (unos 40 mmHg) la curva es muy pendiente, de forma que pequeños cambios en Po₂ dan lugar a una gran liberación de oxígeno hacia los tejidos.

En los tejidos existe una relación entre el transporte de O₂ y el de CO₂, de tal manera que se libera más O₂ cuanto más aumenta la concentración de CO₂; a este fenómeno se le denomina **efecto Bohr**.

(el CO₂ aumenta la concentración de H⁺:

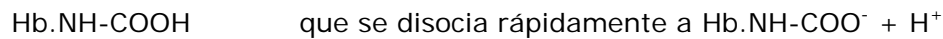


al unirse H⁺ a la Hb se reduce la afinidad de la Hb por el O₂ con lo que la captación de CO₂ favorece la liberación de O₂).

Transporte de CO₂ por la sangre

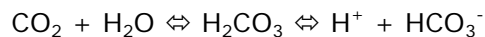
El CO₂ difunde desde los tejidos a la sangre y, en ella existen varios mecanismos para su transporte:

- en solución: cerca del 10 % del CO₂ viaja en solución.
- como **carbaminohemoglobina**: la Hb tiene radicales amino (NH₂). Parte del CO₂ que difunde al interior de los eritrocitos reacciona con las cadenas laterales NH₂ y forma carbaminohemoglobina:



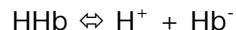
El CO₂ también puede reaccionar con los grupos amino de otras proteínas, formando compuestos carbámicos (carbamínicos).

- como **bicarbonato**: es la forma principal de transporte de CO₂ en la sangre. Se produce la siguiente reacción:



Esta reacción es mucho más rápida en el interior de los eritrocitos que en el plasma.

En los dos últimos mecanismos se forman iones H⁺; en el interior de los eritrocitos la Hb funciona como tampón, eliminando estos H⁺:



Control de la respiración

La respiración se realiza como consecuencia de la descarga rítmica de neuronas motoras situadas en la médula espinal (porciones cervical y torácica), que inervan a los músculos respiratorios. Esta descarga rítmica depende de impulsos que proceden de centros superiores.

Existen dos mecanismos nerviosos:

- voluntario, cuyas neuronas están localizadas en la corteza cerebral. Se emplea en actividades tales como hablar. Las señales nerviosas que van a activar las células de la médula espinal viajan por el tracto córtico-espinal.
- automático o involuntario, cuyas neuronas están localizadas en la formación reticular del tronco encefálico (puente y bulbo). Aunque se trata de una región difusa del encéfalo se le suele llamar **centro respiratorio**. Estas neuronas tienen una actividad rítmica intrínseca, que puede ser modificada por influencias externas, de modo que se ajusta la respiración a las necesidades metabólicas del organismo. Las señales nerviosas en dirección a la médula viajan por el tracto retículo-espinal.

La actividad del centro respiratorio puede modificarse por dos tipos de estímulos:

- químicos: los gases respiratorios (O₂ y CO₂) y los iones H⁺. Si aumenta la P_{CO₂} o la concentración de H⁺, o disminuye la P_{O₂}, aumenta la actividad del centro respiratorio; los cambios opuestos la hacen disminuir. Estos efectos

están mediados por **quimiorreceptores** centrales y periféricos que responden a cambios en la $[H^+]$, PO_2 y P_{CO_2} .

- los quimiorreceptores periféricos están localizados en los cuerpos aórticos y cuerpos carotídeos.
 - los quimiorreceptores centrales están situados en el bulbo.
 - no químicos:
 - **centros superiores:** existe un control voluntario, por ejemplo al hablar o al tocar instrumentos de viento.
 - **propioceptores:** principalmente receptores de distensión situados en el músculo liso de los conductos aéreos.
 - **irritación** de los conductos aéreos: lo que normalmente produce tos y estornudo, con el fin de eliminar la sustancia irritante.
 - **reflejos digestivos:** por ejemplo durante la deglución o el vómito, cerrándose la glotis y evitando que el material que pasa a lo largo del esófago entre en los pulmones.
-

Para la próxima clase debes:

- leer el texto y tratar de comprenderlo.
- conocer la estructura básica del sistema respiratorio.
- entender el papel de las distintas presiones en la mecánica respiratoria.
- entender y ser capaz de dibujar la curva de disociación de la hemoglobina y el efecto Bohr relacionado.
- comprender los ciclos de los gases respiratorios en nuestro organismo.
- comprender los mecanismos de control de la frecuencia respiratoria.