



Conceptos fisiopatológicos básicos

C. MELERO MORENO

Grupo de Habilidades en Patología Infecciosa Respiratoria de la SEMG.

La función primordial del aparato respiratorio es proporcionar oxígeno (O_2) a la sangre arterial y eliminar anhídrido carbónico (CO_2) de la sangre venosa mixta contenida en la arteria pulmonar (intercambio gaseoso). Esto depende del funcionamiento integrado de cuatro eslabones diferentes:

- Ventilación alveolar (VA).
- Difusión alveolocapilar (membrana alveolocapilar).
- Perfusión capilar. Dependiente del gasto cardíaco (Q).
- Relación Ventilación/Perfusión (VA/Q).

Además, hay dos componentes adicionales que influyen sobre la respiración, entendida como el mecanismo que permite el intercambio de gases entre los diferentes componentes celulares y su medio ambiente:

- Control de la ventilación. Adecuación de la ventilación a las necesidades metabólicas.
- Sistema de transporte de oxígeno, que depende a su vez del sistema transporte (contenido de oxígeno) y del elemento transportador Q.

Analizaremos los aspectos de estos seis eslabones desde la relación anatómico-funcional.

■ VENTILACIÓN ALVEOLAR

Determina la renovación cíclica del gas alveolar, para lo cual necesita: A) un sistema conductor (el árbol traqueobronquial) y B) un sistema de fuerza motriz capaz de generar un flujo inspiratorio y vencer

las resistencias del propio parénquima pulmonar y de la caja torácica (mecánica ventilatoria), que se oponen a su paso.

A) Árbol traqueobronquial

Es un sistema de tubos, de diámetro progresivamente menguante según se ramifica, que comienza en la tráquea y se divide sucesivamente hasta los bronquiolos terminales (BT), vías aún carentes de alveolos y por tanto sin participación en el intercambio de gases (espacio muerto anatómico o zona de conducción (figura 1), cuyo volumen es de unos 150 ml). A partir de los BT aumenta el número de ramificaciones y con ello la superficie aumenta de modo exponencial (figura 2). Los BT dan origen a los bronquiolos respiratorios (BR), donde ya se pueden encontrar estructuras alveolares, y finalmente a los sacos alveolares. La zona situada más allá del BT se denomina acino o lobulillo pulmonar. Aquí se produce el intercambio de gases y por ello a todo su conjunto se le conoce como zona respiratoria.

B) Mecánica ventilatoria

Durante la inspiración, y como consecuencia de la contracción de los músculos respiratorios (principalmente el diafragma), aumenta el volumen de la caja torácica, la presión alveolar (PAV) se hace inferior a la atmosférica y se produce el flujo inspiratorio, que es decreciente hasta BT; a partir de aquí la ventilación alveolar es dependiente de la difusión pasiva. La relajación de los músculos inspiratorios y las pro-

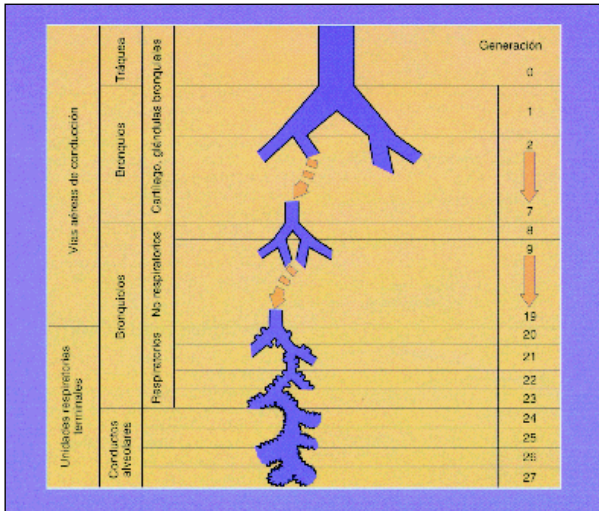


Fig. 1. Representación esquemática de las vías aéreas de conducción y de las unidades respiratorias terminales. A la izquierda se indica la nomenclatura y en el margen derecho de la figura el número de generación dentro del árbol bronquial; la tráquea corresponde a la generación 0 y los bronquios principales a la generación 1.

propiedades elásticas del propio pulmón provocan un retorno pasivo, y con ello se crea el flujo espiratorio (figura 3).

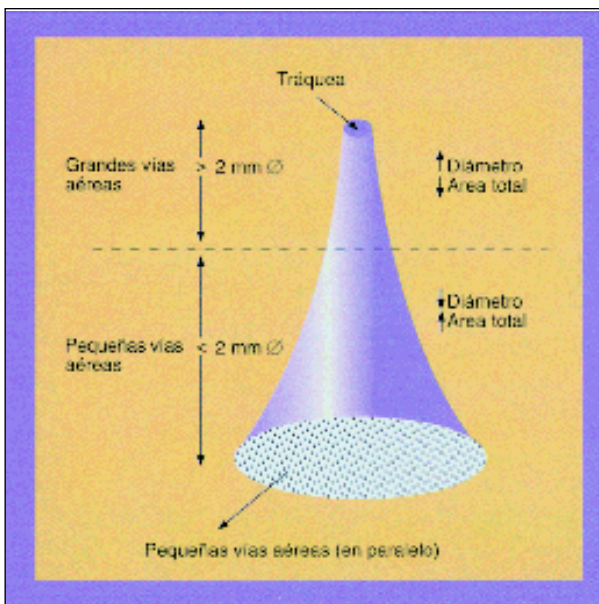


Fig. 2. Esquema que refleja la disposición "en campana" de las vías aéreas. Las pequeñas vías aéreas (diámetro inferior a 2 mm) tienen una superficie global muy amplia por hallarse dispuestas en paralelo, a pesar de que su calibre individual sea menor que el de la tráquea o el de las grandes vías aéreas (diámetro superior a 2 mm).

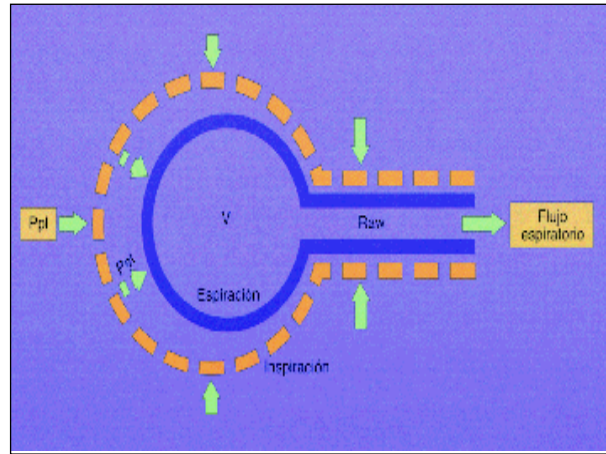


Fig. 3. Esquema de los factores determinantes del flujo espiratorio. El círculo corresponde a un alveolo (en línea discontinua durante la inspiración y en línea continua al final de la espiración). Ppl: incremento de la presión pleural generado por la caja torácica durante la expiración. Pst: fuerza de retracción elástica del pulmón. V: volumen pulmonar. Raw: resistencia de las vías aéreas. La Ppl y la Pst constituyen las fuerzas que incrementan la presión intraalveolar y general del flujo espiratorio que será mayor cuanto mayor sea el volumen pulmonar. La resistencia de las vías aéreas depende del diámetro de las mismas y es un factor que disminuye el flujo espiratorio.

Volúmenes y capacidades pulmonares (figura 4)

- VT-Volumen corriente o tidal volumen. Corresponde al volumen de aire que entra en los pulmones con cada inspiración (500 ml aproximadamente).
- TLC-Capacidad pulmonar total. La cantidad de aire que contienen los pulmones cuando se encuentran totalmente distendidos.

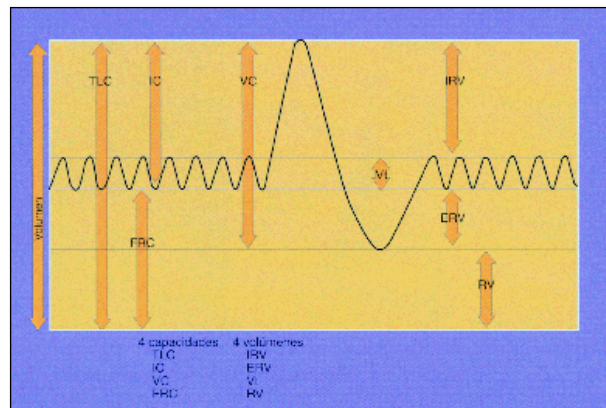


Fig. 4. Espirograma simple con indicaciones de los principales volúmenes pulmonares estáticos. Las capacidades corresponden a la suma de volúmenes. Mediante esta maniobra no podremos conocer el volumen residual (RV) y, por tanto, no será posible calcular la TLC ni la FRC.

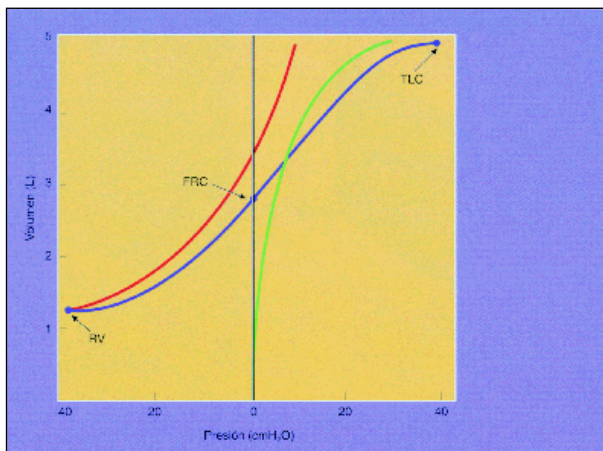


Fig. 5. Relación presión-volumen (distensibilidad) para el parénquima pulmonar aislado (línea verde), la caja torácica (línea roja) y la combinación de ambos (línea azul).

- RV-Volumen residual. Es el volumen de aire que queda atrapado en el pulmón tras una espiración máxima partiendo desde TLC.
- VC-Capacidad vital. La cantidad de aire espirado en la maniobra anterior.
- FRC-Capacidad residual funcional. Es la cantidad de aire que queda atrapado en el pulmón después de una espiración normal; equivale a la suma del VR y el volumen de reserva espiratorio (VRE).

Todos estos parámetros dependen de la edad, la talla, peso y sexo del individuo, por lo que suelen referirse en porcentajes con arreglo a valores teóricos.

Propiedades mecánicas de tipo estático

La caja torácica y el parénquima pulmonar son estructuras elásticas, es decir, cualquier variación en la presión entraña un cambio volumétrico (distensibilidad pulmonar, torácica o respiratoria, respectivamente). En la figura 5 se manifiesta esta relación para la caja torácica y el pulmón por separado y lo que representa el cambio funcionando como unidad (equilibrio funcional). En la práctica suele determinarse el valor de la distensibilidad pulmonar (Pst); corresponde a la diferencia entre la presión alveolar (PAV) y la presión pleural (Ppl). Dos ejemplos de distensibilidad pulmonar contrapuestos son la fibrosis pulmonar como disminuida, y el enfisema como aumentada.

Propiedades mecánicas de tipo dinámico

En su tránsito hacia los alveolos, el flujo aéreo debe vencer las resistencias de la vía aérea (Raw). El hecho de que dependa del área de la sección global de las vías aéreas y que aumente exponencialmente

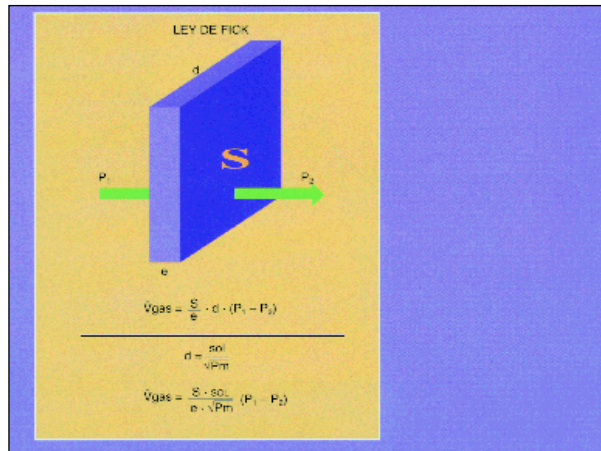


Fig. 6. Diferentes modelos de difusión de gases a través de una membrana. El modelo más simple, estático, sigue la ley de Fick. d: constante de difusión del gas en la membrana, equivalente a la relación entre el coeficiente de solubilidad de la membrana (sol) y la raíz cuadrada del peso molecular (P_m) del gas. \dot{V}_{gas} : volumen de gas que difunde por unidad de tiempo; S: superficie de la membrana; e: espesor de la membrana; P₁ y P₂: presión parcial del gas a uno y otro lado de la membrana.

con cada nueva generación bronquial, hace que la Raw disminuya en las zonas periféricas y que su mayor componente esté en las vías aéreas de grueso calibre (80%) y el resto corresponda a las vías más periféricas. La Raw aumenta con la disminución del calibre de la vía aérea y disminuye conforme aumenta el volumen pulmonar. Este hecho obliga siempre a corregir su cálculo con el volumen pulmonar al que se ha calculado.

■ DIFUSIÓN ALVEolocapILAR DE OXÍGENO

El intercambio de O₂ y CO₂ entre el gas alveolar y luz capilar se produce por difusión pasiva y por tanto por simple diferencia de presión; se rige por la ley de Fick (figura 6):

$$\dot{V}_{\text{gas}} = (\text{Área/grosor}) \times (P_1 - P_2) \times D (*)$$

Cuando el tiempo de tránsito capilar del hemátites es corto (ejercicio) y las condiciones del aire inspirado descienden en su proporción de O₂, la difusión puede verse modificada por alteración en la relación de presiones. Las enfermedades caracteriza-

* D = constante de difusión, que es directamente proporcional a la solubilidad del gas e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su peso molecular.

das por un aumento del espesor de la barrera (fibrosis pulmonar) la dificultarían incluso respirando aire ambiente (bloqueo alveolocapilar).

■ PERFUSIÓN PULMONAR

En el pulmón existen dos sistemas circulatorios diferentes: la circulación pulmonar propiamente dicha, que es la que más nos interesa cuantitativa y cualitativamente desde el punto de vista de participación en el intercambio de gases, y la circulación bronquial, cuya función primordial es nutricia y cuya participación en el gasto cardíaco es mínima, salvo en insuficiencia cardíaca izquierda muy grave y en bronquiectasias. Incluso la función pulmonar queda inalterada sin circulación bronquial (trasplante pulmonar).

Las características funcionales deben ser tales que debe adecuarse a cualquier gasto cardíaco con el mínimo coste energético; por ello su resistencia al flujo sanguíneo es mínima (2 mmHg/l/min) y su régimen de presiones es muy bajo (15 mmHg presión media de la arteria pulmonar).

El flujo capilar pulmonar depende de dos fuerzas antagónicas, la PAV y la presión de perfusión pulmonar, cuya diferencia se conoce como presión transmural. Dado que la PAV se mantiene constante y la presión hidrostática aumenta en dirección a las bases en bipedestación, se determinan 3 zonas funcionales pulmonares (zonas de West), que varían con arreglo a la postura (figura 7).

Además, junto a factores mecánicos reguladores del flujo, la circulación pulmonar posee un mecanismo de control activo frente a la hipoxia (vasoconstricción hipóxica), que actúa cuando la presión alveolar de O₂ es inferior a 70 mmHg, lo que evita la perfu-

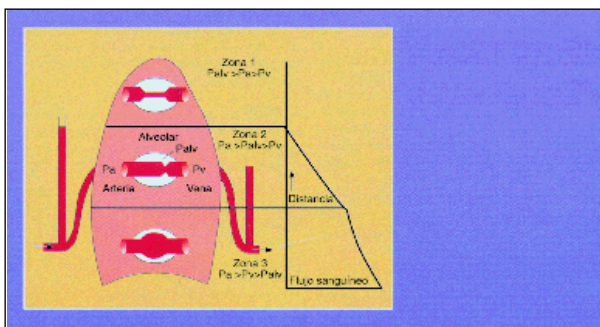


Fig. 7. Esquema que ilustra la falta de homogeneidad de la distribución de la perfusión pulmonar, basado en la relación presión arterial-presión venosa.

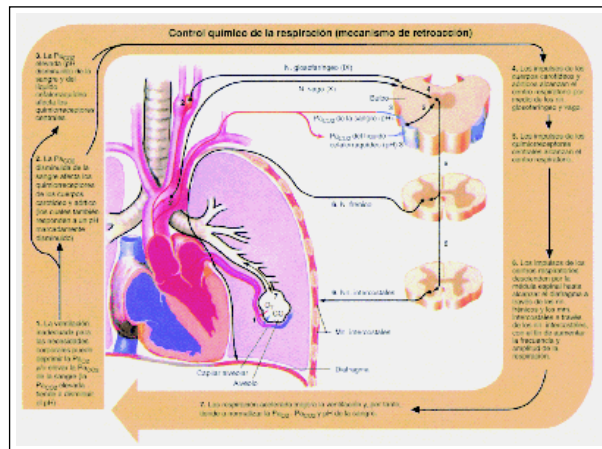


Fig. 8. Control químico de la respiración (mecanismo de retroacción).

sión de áreas mal ventiladas y con ello el deterioro de la relación (VA/Q).

■ RELACIÓN VENTILACIÓN-PERFUSIÓN

La eficacia es máxima cuando la relación equivale a la unidad.

Control de la ventilación

La adaptación a las necesidades metabólicas del organismo (consumo de O₂ y eliminación de CO₂) implica cambios hemodinámicos y ventilatorios; a diferencia del corazón, el pulmón no posee una actividad intrínseca propia, sino que se lleva a cabo a través de un control automático (patrón ventilatorio) (figuras 8 y 9).

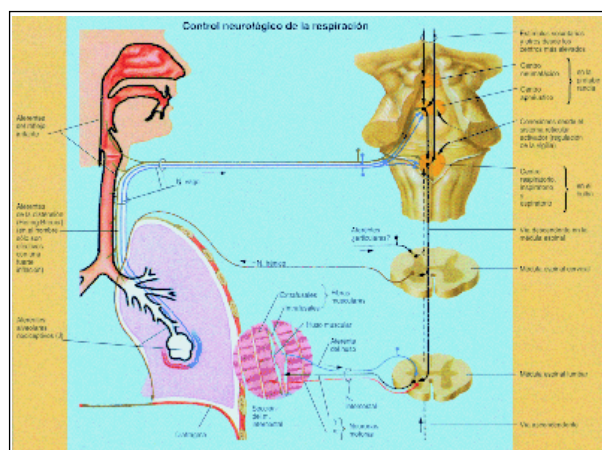


Fig. 9. Control neurológico de la respiración.

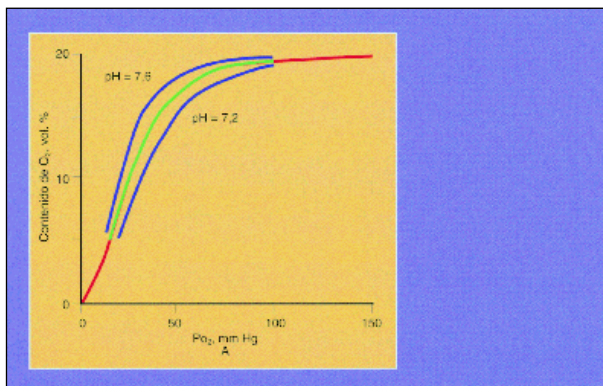


Fig. 10. Curva de disociación de la hemoglobina para el oxígeno, mostrando las variaciones en la disposición espacial de dicha curva inducidas por modificaciones en el pH sanguíneo (efecto Borh).

La relación con la corteza cerebral en esta integración permite el control voluntario del patrón ventilatorio y en ella reside la sensación de disnea.

Transporte de oxígeno

El hecho de que la mayoría de las reacciones meta-

bólicas se produzcan en condiciones aeróbicas hace necesario un transporte de O_2 que permita un aporte energético continuo. Dicho aporte depende de 2 factores:

1. La cantidad total de O_2 transportada por unidad de volumen sanguíneo (contenido arterial de O_2 , CaO_2).

2. El volumen de sangre movilizado por unidad de tiempo (gasto cardíaco, Qt).

$$QO_2 \text{ (vol \% l/min)} = CaO_2 \text{ (vol \%)} \times Qt \text{ (l/min)}$$

$$CaO_2 = (PaO_2 \times 0,003) + (Hb \times SaO_2 \times 1,39)$$

Cuando las necesidades aumentan (ejercicio), los requerimientos metabólicos se pueden satisfacer a partir de dos mecanismos: incrementando la extracción periférica de O_2 y aumentando el gasto cardíaco. Junto a estos dos mecanismos principales, existen otros mecanismos compensadores que contribuyen a mejorar el aporte periférico de O_2 , pero que, bien por su lenta instauración o sus efectos secundarios, revisten menor importancia (poliglobulia, cambios en la afinidad de la Hb por el O_2 : pH, P_{CO_2} , temperatura y concentración de 2,3-difosfoglicerato) (figura 10).