

Fisiología del sistema respiratorio: intercambio gaseoso y ventilación pulmonar

Dra. Desirée Victoria Montesinos
Dr. Adrián Mateo Orcajada

Fisiología del Aparato Respiratorio

Dra. Desirée Victoria Montesinos

Dr. Adrián Mateo Orcajada

Fisiología Humana

I. Funciones Generales y Organización

Homeostasis y Metabolismo Celular

Intercambio de Gases

La función primaria es el intercambio de O_2 y CO_2 entre la atmósfera y la sangre. El oxígeno es el aceptor final de electrones en la cadena respiratoria mitocondrial, permitiendo la producción eficiente de ATP mediante la fosforilación oxidativa. Sin este suministro constante, las células entran en metabolismo anaeróbico, acumulando lactato.

Eliminación de CO_2

El CO_2 es un subproducto del ciclo de Krebs. Su acumulación resultaría en una acidosis respiratoria severa. El sistema respiratorio regula la presión parcial de CO_2 ($PaCO_2$) mediante la ventilación alveolar, manteniendo el equilibrio ácido-base sistémico en conjunto con los riñones (amortiguación por bicarbonato).

Funciones No Respiratorias Críticas

Regulación del pH Interno

Mediante el control de la eliminación de CO_2 , el pulmón actúa de forma casi instantánea sobre el pH sanguíneo. La ecuación de Henderson-Hasselbalch demuestra cómo cambios en la ventilación modifican el componente respiratorio del equilibrio ácido-base, compensando alteraciones metabólicas primarias.

Protección y Metabolismo

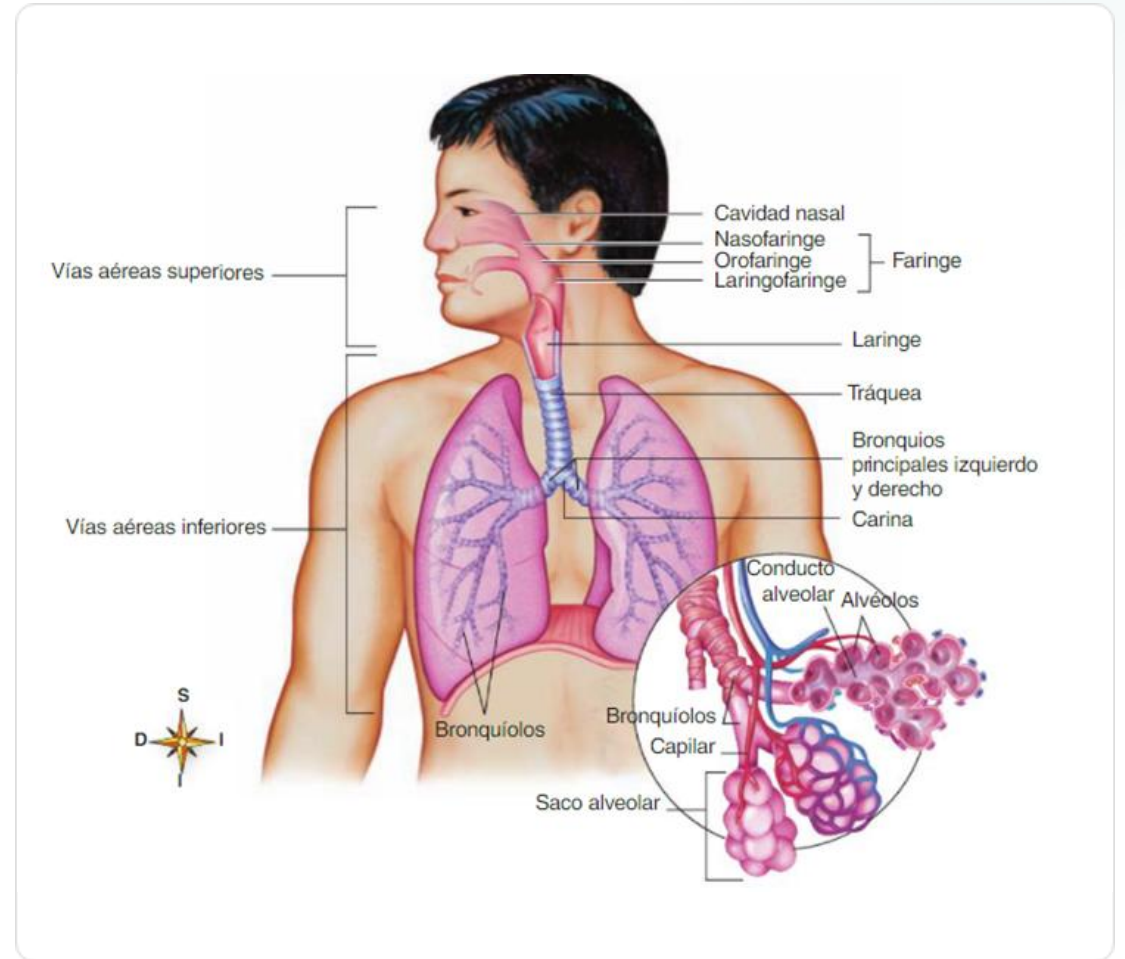
El sistema respiratorio actúa como filtro para la circulación sistémica. Además, las células endoteliales de los capilares pulmonares poseen funciones metabólicas vitales, como la conversión de Angiotensina I en Angiotensina II mediante la ECA (Enzima Convertidora de Angiotensina), clave en la presión arterial.

Organización del Tracto Respiratorio

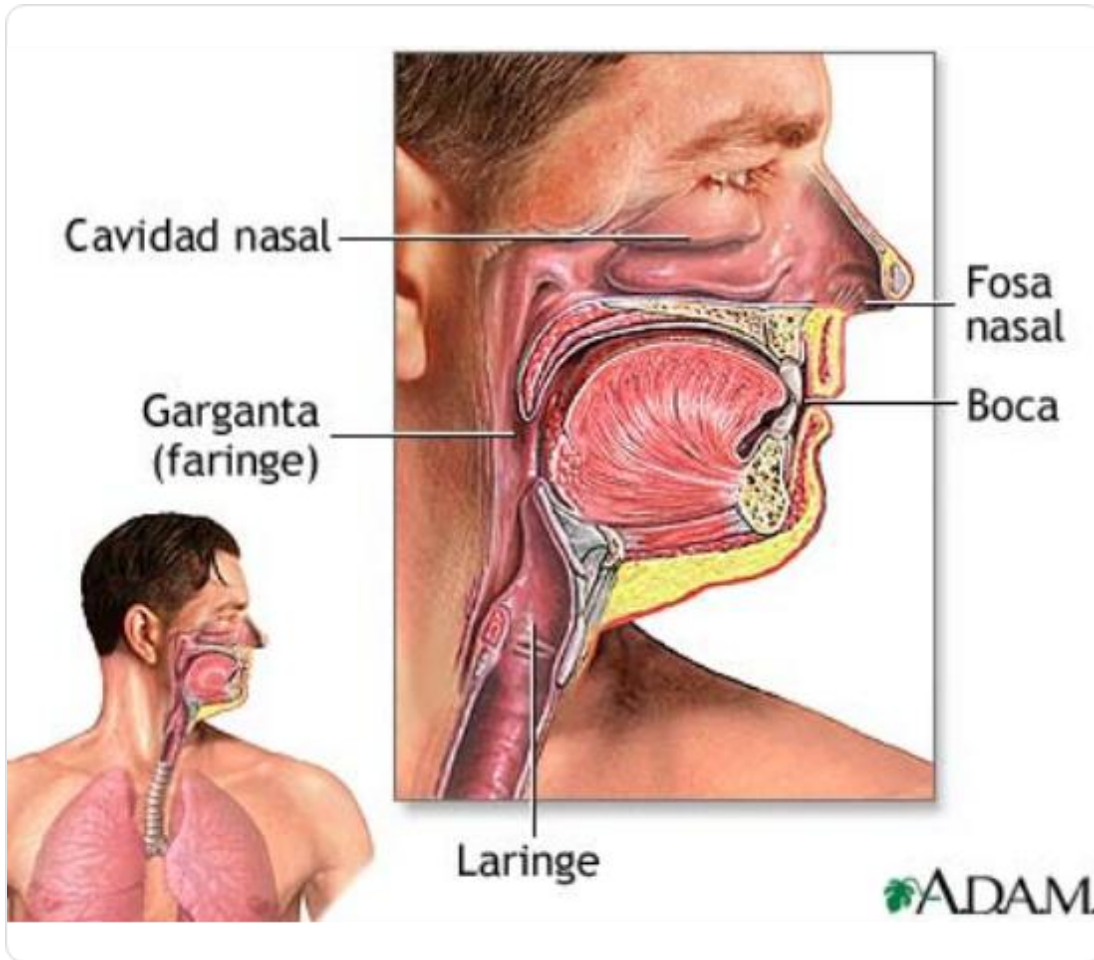
Funcionalmente, el sistema se divide en una zona de conducción y una zona respiratoria:

- **Tracto Superior:** Comprende la cavidad nasal, faringe y laringe. Su función es filtrar, calentar y humedecer el aire inspirado (acondicionamiento).
- **Tracto Inferior:** Inicia en la tráquea, ramificándose en el árbol bronquial hasta los alvéolos.
- **Zona de Intercambio:** Formada por los bronquiolos respiratorios, conductos y sacos alveolares.

La arquitectura está diseñada para maximizar el área de superficie en un volumen torácico limitado.



Fisiología de las Vías Superiores



Nariz y Faringe

La cavidad nasal posee cornetes que generan un flujo turbulento, forzando al aire a entrar en contacto con la mucosa altamente vascularizada. Esto eleva la temperatura a 37°C y la humedad al 100%.

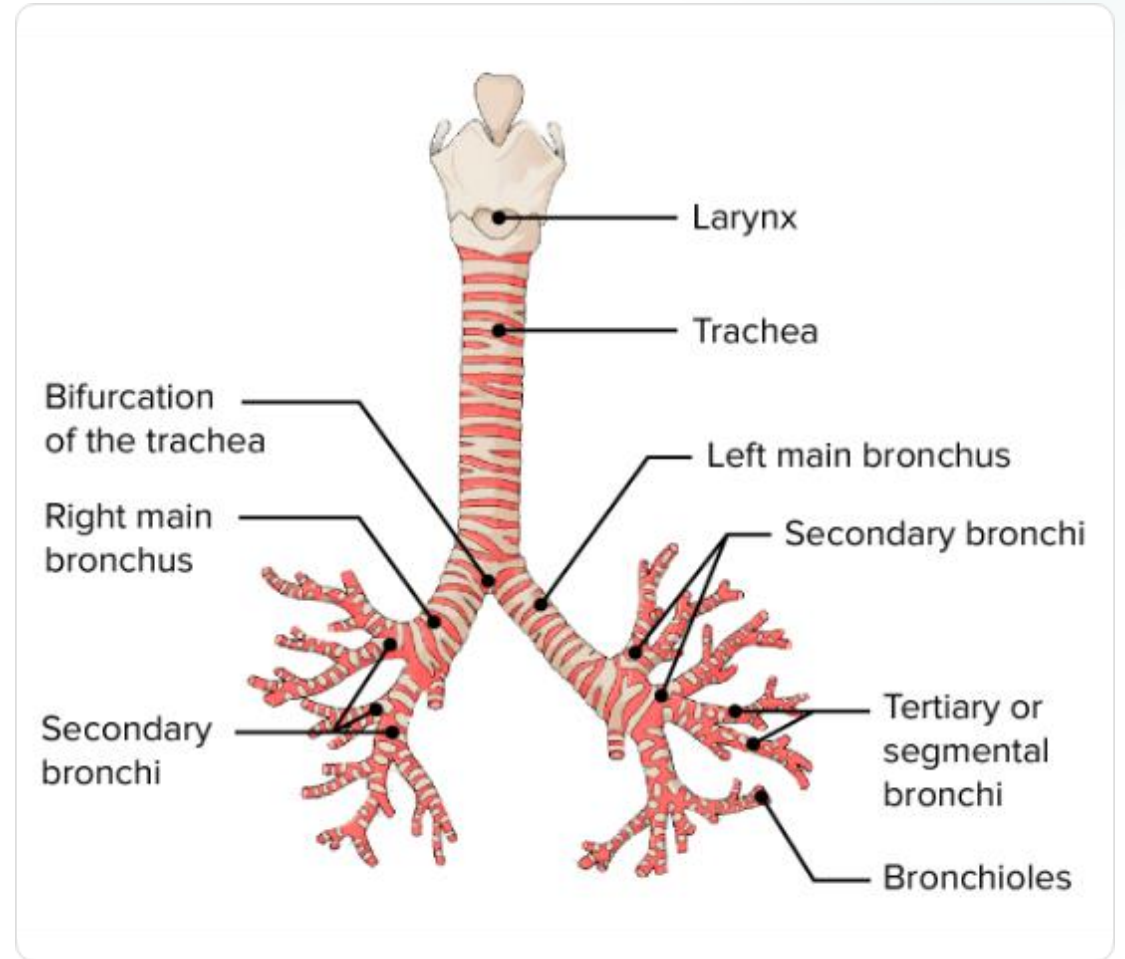
La Laringe

Actúa como la "puerta de entrada" a las vías inferiores. El cartílago epiglotis evita la aspiración de alimentos durante la deglución. Contiene las cuerdas vocales, esenciales para la fonación (control motor complejo del flujo de aire expirado).

La Tráquea y el Árbol Bronquial

La tráquea se divide en la **Carina** en dos bronquios principales. Estos sufren aproximadamente 23 niveles de ramificación dicotómica:

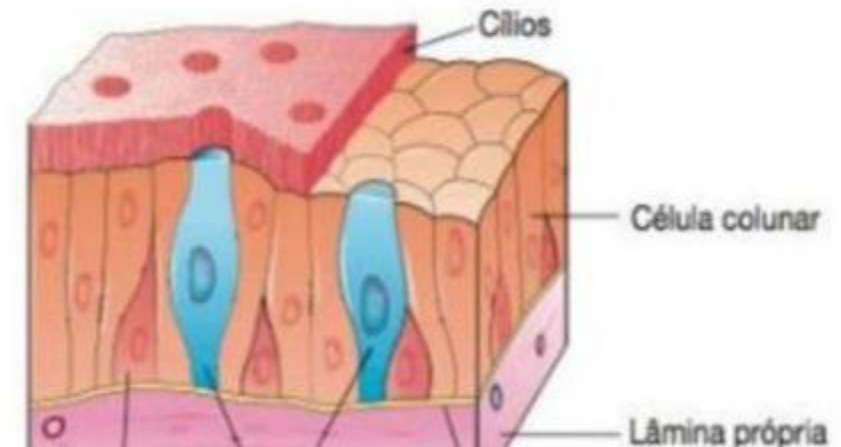
- **Bronquios:** Poseen cartílago para mantener la permeabilidad.
- **Bronquiolos:** Carecen de cartílago; su diámetro está regulado por músculo liso bajo control del sistema nervioso autónomo.
- **Resistencia:** A medida que la sección transversal total aumenta (por la ramificación masiva), la resistencia individual cae, permitiendo un flujo de aire eficiente en las zonas distales.



Mucosa Respiratoria

El epitelio es de tipo **pseudoestratificado ciliado**. Contiene células caliciformes que secretan moco viscoso.

Aparato Mucociliar: Los cilios baten rítmicamente hacia la faringe (ascensor mucociliar) para eliminar partículas y microorganismos atrapados. El humo del tabaco y la deshidratación paralizan este mecanismo, predisponiendo a infecciones respiratorias crónicas y acumulación de secreciones.



Métricas de Intercambio Alveolar

300 M

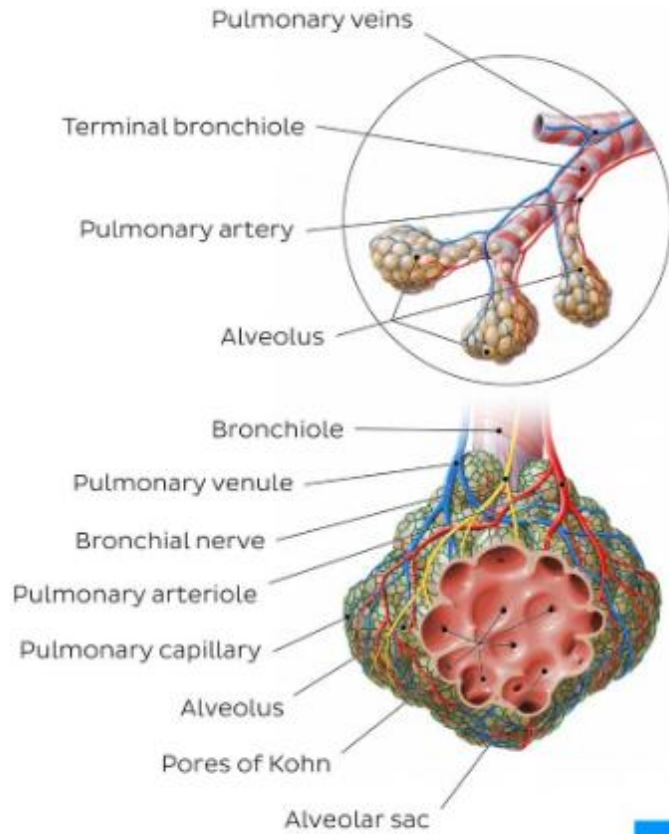
ALVÉOLOS PULMONARES

La superficie total de intercambio gaseoso es de aproximadamente **70-100 metros cuadrados** (equivalente a media pista de tenis). Esta enorme superficie, combinada con una barrera extremadamente delgada, garantiza una difusión pasiva ultrarrápida. La densidad capilar es tal que el flujo sanguíneo se comporta como una "lámina" de sangre que envuelve a los alvéolos, optimizando la oxigenación en menos de 0.75 segundos de tránsito capilar.

Unidad Funcional: El Alvéolo

Arquitectura Celular

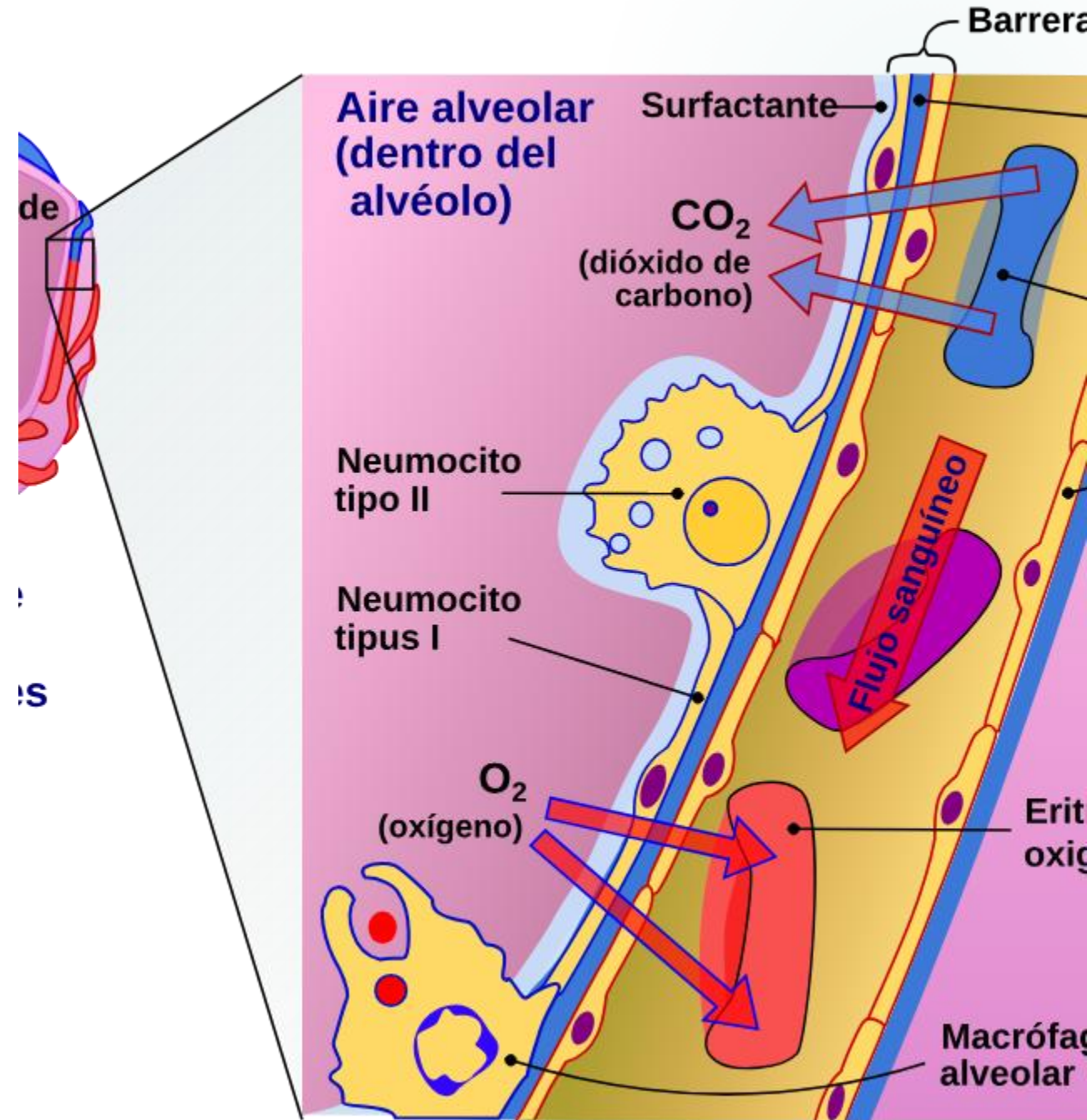
- **Neumocitos Tipo I:** Células planas que cubren el 95% de la superficie alveolar. Optimizadas para la difusión debido a su mínimo espesor.
- **Neumocitos Tipo II:** Células cúbicas encargadas de la síntesis de **surfactante** y la reparación epitelial tras lesiones.
- **Macrófagos Alveolares:** Células de "limpieza" que fagocitan partículas que alcanzaron la zona respiratoria (polvo, bacterias).



Tensión Superficial

La interfase aire-líquido en el alvéolo tiende al colapso (Ley de Laplace: $P = 2T / r$).

El **Surfactante Pulmonar** (fosfolípidos y proteínas) reduce la tensión superficial. Esto evita el colapso de los alvéolos pequeños al final de la espiración (atelectasia) y reduce el trabajo respiratorio, aumentando la distensibilidad pulmonar. Su ausencia es la causa del Síndrome de Dificultad Respiratoria Neonatal.

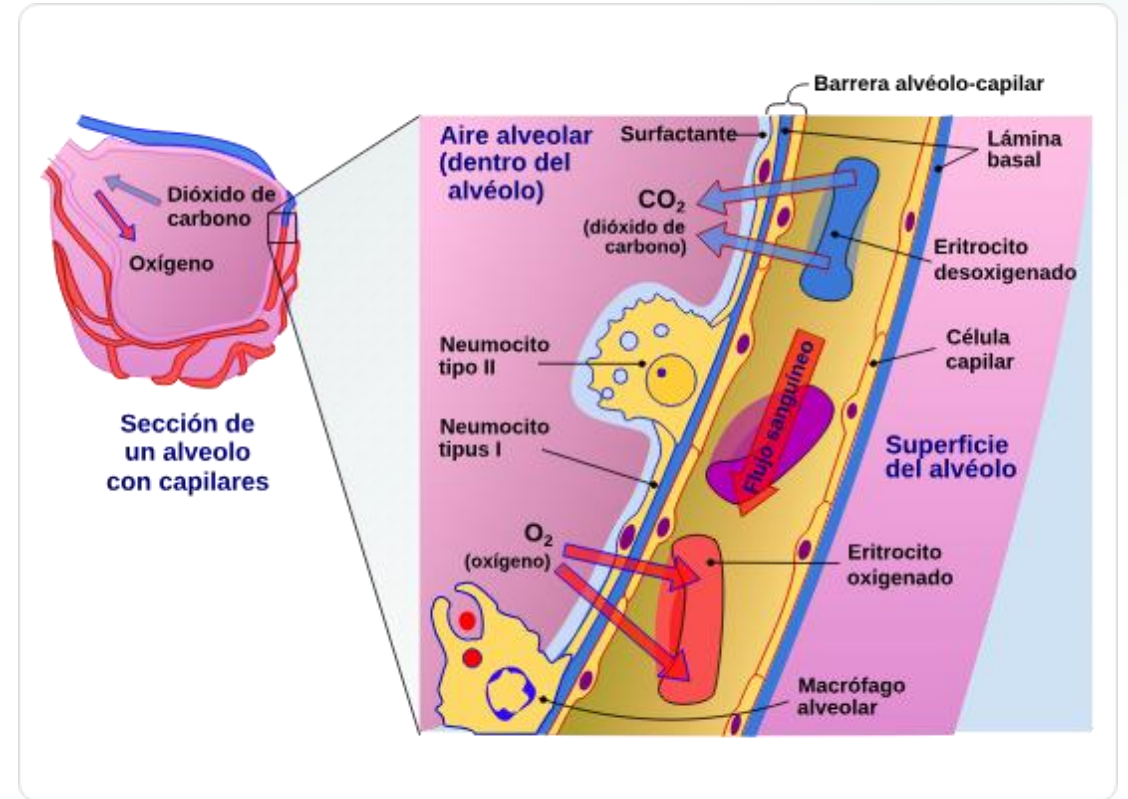


La Barrera Hematogaseosa

Para que el O_2 llegue al eritrocito, debe atravesar:

1. Capa de surfactante y fluido.
2. Epitelio alveolar (Neumocito I).
3. Membrana basal epitelial.
4. Espacio intersticial (mínimo).
5. Membrana basal capilar.
6. Endotelio capilar.

El grosor total es de solo **0.5 micras**. Factores como el edema o la fibrosis aumentan este grosor, dificultando gravemente la difusión.



II. Mecánica de la Ventilación

Física de las presiones, cumplimiento pulmonar y volúmenes estáticos y dinámicos.

Dinámica de Presiones Torácicas

Presión Intrapleural

Siempre negativa respecto a la atmosférica (≈ -5) cmH₂O en reposo). Es el resultado de la tendencia del pulmón a retraerse elásticamente y la pared torácica a expandirse. Esta presión mantiene al pulmón "pegado" a la caja torácica.

Presión Transpulmonar

Diferencia entre presión alveolar e intrapleural. Determina el grado de inflación pulmonar. Según la **Ley de Boyle**, un aumento de volumen torácico disminuye la presión alveolar por debajo de la atmosférica, forzando la entrada de aire.

Control Motor del Ciclo

Inspiración (Activa)

El **Diafragma** es el músculo principal (inervado por el nervio frénico C3-C5). Al contraerse, desciende aumentando el eje vertical del tórax. Los intercostales externos elevan las costillas ("asa de cubo"), aumentando el diámetro transversal y anteroposterior.

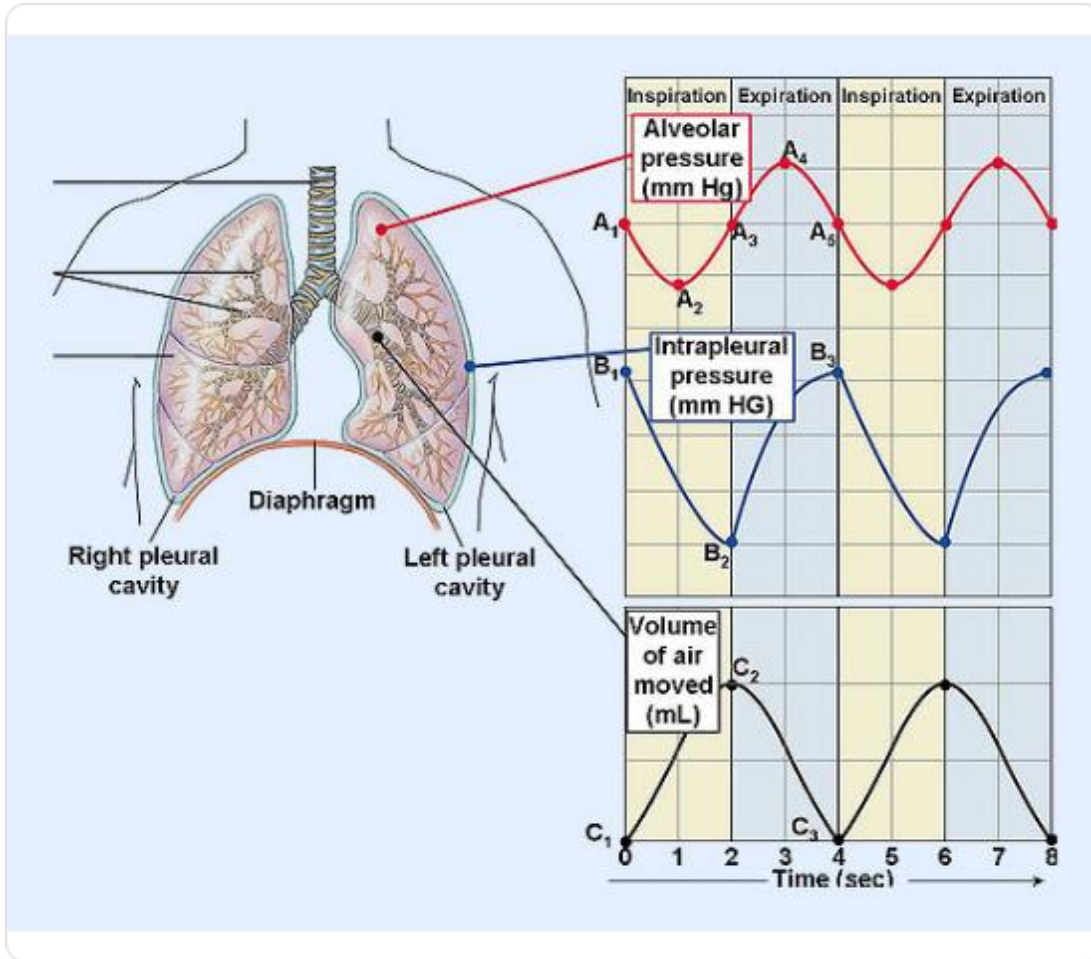
Expiración (Pasiva)

En reposo, es un proceso pasivo debido al retroceso elástico de los pulmones. En la espiración forzada (ejercicio, tos), actúan los músculos abdominales y los intercostales internos para comprimir la cavidad torácica.

El Ciclo: Cambios de Presión

Secuencia Fisiológica

1. Impulso neural del tronco encefálico.
2. Contracción del diafragma e intercostales.
3. Aumento del volumen intratorácico.
4. Disminución de la Presión Pleural (P_{pl}).
5. Aumento de la Presión Transpulmonar.
6. Expansión alveolar y caída de Presión Alveolar ($P_a < P_{atm}$).
7. Flujo de aire hasta equilibrio de presiones.



Distensibilidad Pulmonar

Concepto de Compliance

Es la medida del cambio de volumen pulmonar por cada unidad de cambio en la presión transpulmonar ($C = \Delta V / \Delta P$). Depende de la elasticidad tisular (colágeno/elastina) y la tensión superficial alveolar.

Patologías Asociadas

Enfisema: Aumenta la compliance (pulmón flácido, fácil de inflar pero difícil de vaciar). **Fibrosis:** Disminuye la compliance (pulmón rígido, requiere gran esfuerzo para expandirse).

Dinámica del Flujo Aéreo

Ley de Poiseuille

La resistencia es inversamente proporcional a la cuarta potencia del radio. Pequeños cambios en el radio del bronquiolo (broncoconstricción) generan grandes aumentos en la resistencia y el trabajo respiratorio.

Control Autónomo

La estimulación parasimpática (ACh) causa broncoconstricción. La estimulación simpática (Adrenalina sobre receptores β_2) causa broncodilatación, fundamental durante la respuesta de lucha o huida.

Coste Energético de la Respiración

Componentes del Trabajo

El trabajo se realiza para vencer el retroceso elástico (trabajo de elasticidad) y la fricción del aire contra las paredes bronquiales (trabajo de resistencia).

Normalmente consume solo el 3% del oxígeno corporal.

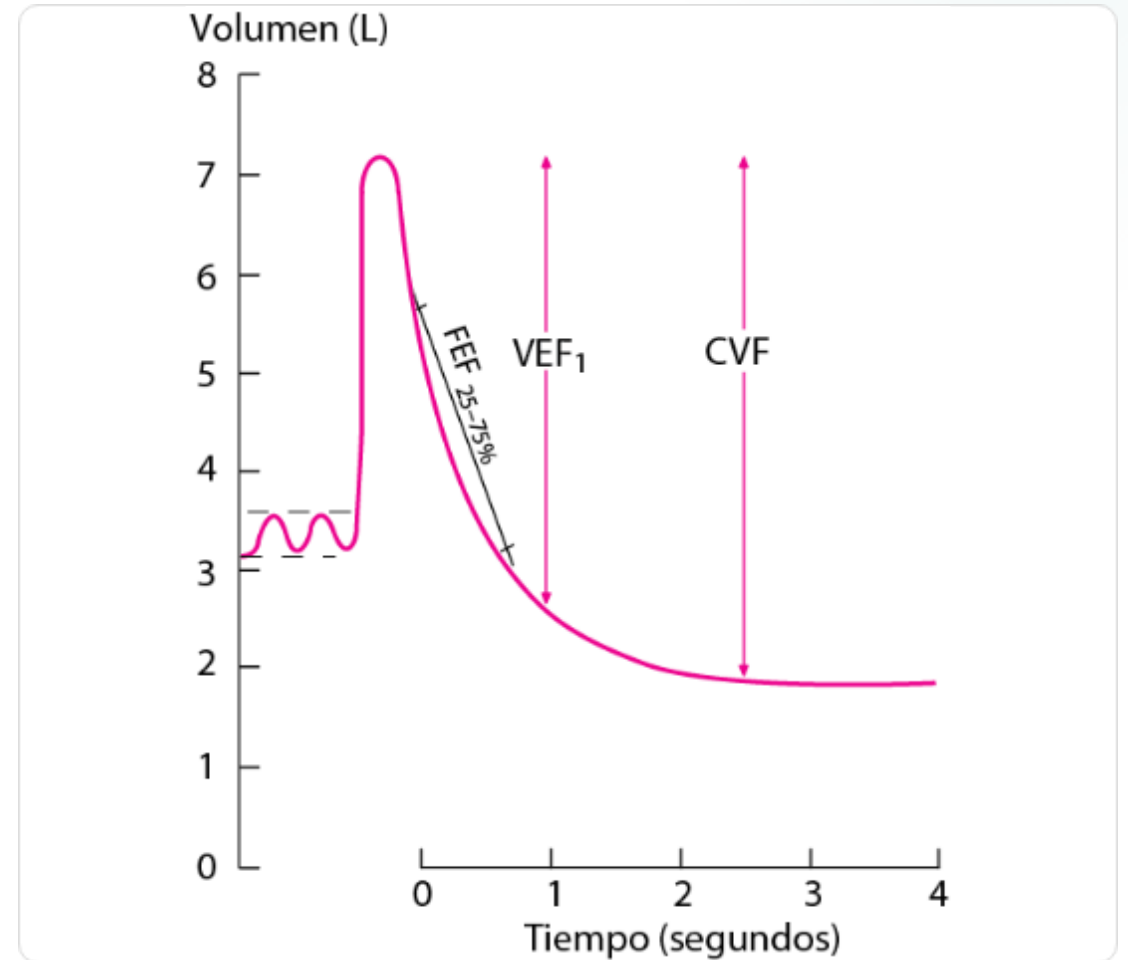
Aumento en Patología

En el asma o EPOC, el trabajo de resistencia aumenta drásticamente. En la insuficiencia cardíaca (edema), el trabajo elástico aumenta. Esto puede llevar a la fatiga de los músculos respiratorios y fallo ventilatorio.

Volúmenes y Capacidades Pulmonares

La espirometría mide los flujos y volúmenes de aire. Es la herramienta diagnóstica fundamental para diferenciar patrones obstructivos de restrictivos.

- **Volumen Corriente (VC):** Aire movilizado en respiración normal (≈ 500 ml).
- **Volumen de Reserva Inspiratoria (VRI):** Aire extra que se puede inspirar forzadamente.
- **Volumen Residual (VR):** Aire que permanece tras espiración máxima; evita el colapso pulmonar.



Capacidades Pulmonares Promedio (Hombre)

Capacidad	Definición / Cálculo	Valor (ml)
Capacidad Vital (CV)	VRI + VC + VRE (Aire máximo movilizable)	4600 - 4800
Capacidad Residual Funcional (CRF)	VRE + VR (Aire en pulmón tras exhalación normal)	2300
Capacidad Inspiratoria (CI)	VC + VRI	3500
Capacidad Pulmonar Total (CPT)	CV + VR	5800 - 6000

**Nota: Estos valores varían según edad, sexo, altura y etnia del individuo.*

III. Transporte de Gases y Control

Leyes de difusión, transporte por hemoglobina y regulación neuroquímica central.

Leyes Físicas de la Difusión

Ley de Fick

La velocidad de difusión es proporcional al área y al gradiente de presión, e inversamente proporcional al espesor de la membrana. El gradiente de presión del O_2 ($P_{Alv} = 100$) mmHg vs ($P_{Cap} = 40$) mmHg) es el motor de la oxigenación.

Ley de Henry y Graham

El CO_2 es 20 veces más soluble que el O_2 . Por ello, aunque su gradiente de presión es menor (46 a 40) mmHg), difunde con mucha mayor facilidad. La hipoxemia suele preceder a la hipercapnia en enfermedades intersticiales.

Hemoglobina y Oxihemoglobina

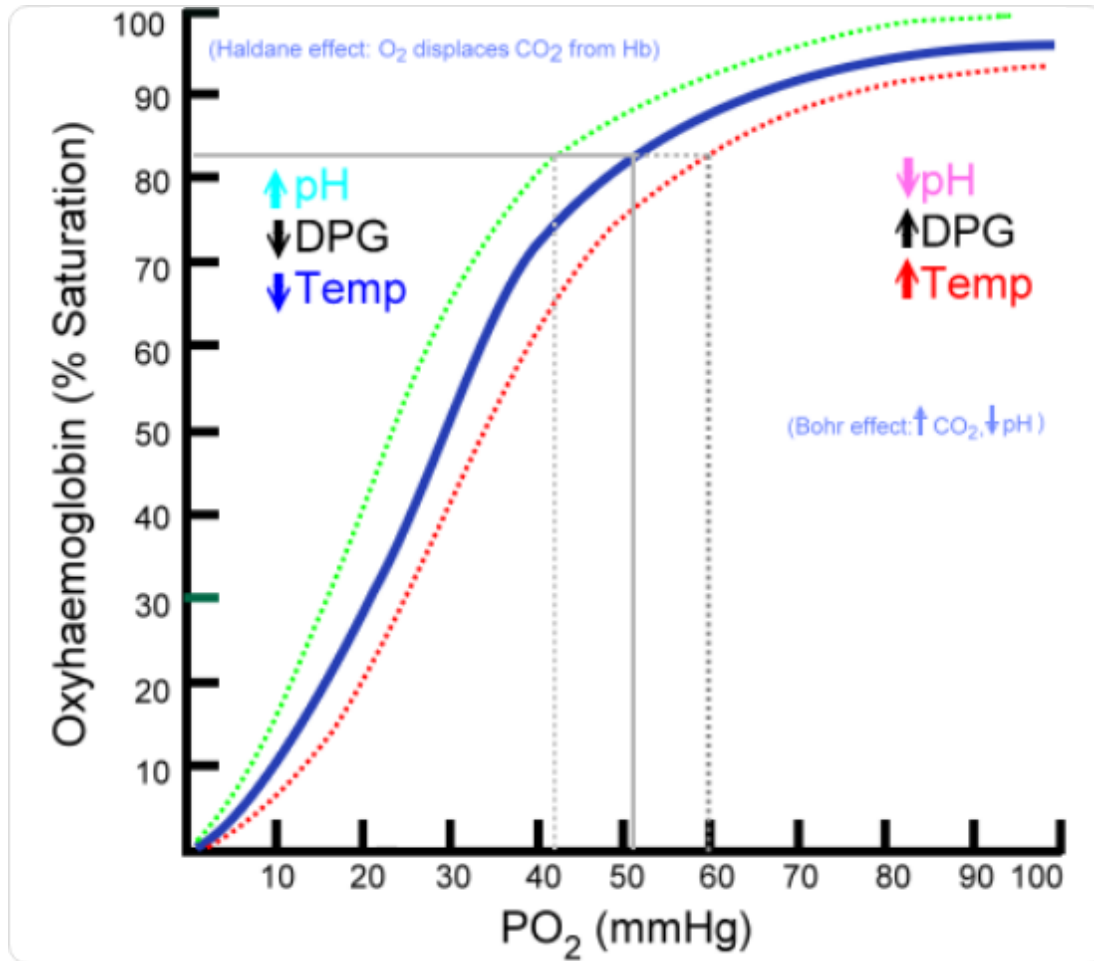
Mecanismo de Transporte

Solo el 1.5% del O_2 viaja disuelto en plasma. El 98.5% se une de forma reversible a la **Hemoglobina (Hb)**. Cada gramo de Hb transporta 1.34 ml de O_2 . La saturación arterial normal (SaO_2) es $>95\%$.

Curva de Disociación

La curva tiene forma sigmoidea (cooperatividad). En el pulmón (meseta), la Hb se carga fácilmente. En los tejidos (pendiente), la Hb libera O_2 rápidamente ante pequeñas caídas de presión parcial.

Factores que Afectan la Afinidad



Efecto Bohr

El aumento de CO_2 , acidez ($\downarrow pH$) o temperatura desplaza la curva a la derecha (disminuye la afinidad). Esto favorece la entrega de oxígeno en tejidos metabólicamente activos (ejercicio).

2,3-DPG

Este compuesto se eleva en situaciones de hipoxia crónica (altitud, anemia), facilitando la liberación de O_2 a los tejidos periféricos.

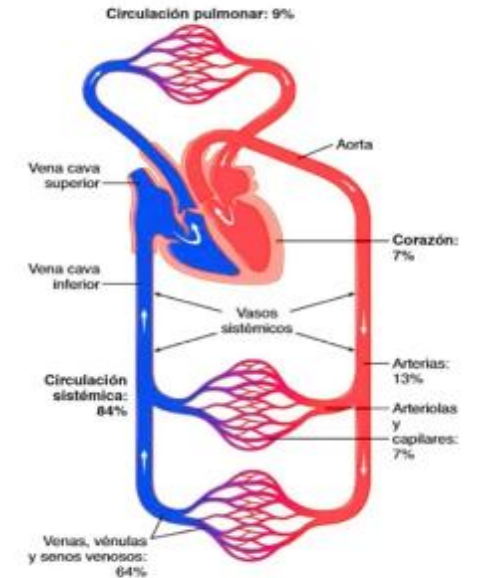
Mecanismos de Transporte de CO₂

El CO₂ viaja por la sangre de tres formas:

1. **Bicarbonato (HCO_3^-):** 70%. Gracias a la anhidrasa carbónica en el eritrocito.
2. **Carbaminohemoglobina:** 23%. Unido a grupos amino de la globina.
3. **Disuelto:** 7%.

Efecto Haldane: La desoxigenación de la sangre aumenta la capacidad de la hemoglobina para transportar CO₂. Esto optimiza la carga de CO₂ en los tejidos y su descarga en el pulmón.

Principios
básicos de
la función
circulatoria:
distribución y
presiones sanguíneas



Hemodinámica Pulmonar

Baja Presión y Resistencia

A diferencia de la sistémica, la circulación pulmonar es de baja presión ($\sim 25/8$ mmHg). El ventrículo derecho requiere menos pared muscular. El lecho capilar tiene una enorme capacidad de reclutamiento ante aumentos del gasto cardíaco.

Vasoconstricción Hipóxica

Respuesta única del pulmón: ante alvéolos mal ventilados (bajo O_2), las arteriolas se contraen para desviar la sangre a zonas bien ventiladas. Esto optimiza la relación V/Q pero, si es global, causa Hipertensión Pulmonar.

La Relación Ventilación/Perfusión

Equilibrio Crítico

Para un intercambio ideal, la ventilación (V) debe coincidir con el flujo sanguíneo (Q). El valor ideal es 0.8. La gravedad causa que en bipedestación la base pulmonar esté más perfundida y ventilada que el ápice (Zonas de West).

Desequilibrios

Shunt ($V/Q = 0$): Alvéolo perfundido pero no ventilado (neumonía, colapso). **Espacio Muerto ($V/Q = \infty$):** Alvéolo ventilado pero no perfundido (tromboembolismo pulmonar).

Regulación Neural y Química

Centros Respiratorios

Ubicados en el bulbo raquídeo y la protuberancia. El Grupo Respiratorio Dorsal genera el ritmo básico. El Centro Neumotáxico limita la inspiración para controlar la frecuencia. El control voluntario reside en la corteza cerebral.

Quimiorreceptores

Centrales: En el bulbo, sensibles a cambios de pH en LCR (inducidos por CO_2). **Periféricos:** En cuerpos aórticos y carotídeos, sensibles principalmente a la caída drástica de O_2 ($\text{PaO}_2 < 60$ mmHg).

Fisiología del Aparato Respiratorio

Dra. Desirée Victoria Montesinos

Dr. Adrián Mateo Orcajada

Fisiología Humana
