

# Biofísica de la Respiración

Esp. Bioq. Pedro Catania

**¿POR QUE RESPIRA  
UN HOMBRE?**

Genera moléculas con enlaces de alta energía



glucosa

Proviene de los alimentos

Proviene del aire

Debe eliminarse al exterior

O<sub>2</sub> recibe equivalentes de reducción y se genera H<sub>2</sub>O

Es necesario disponer de algún sistema de conduzca el **oxígeno** desde el medio exterior al medio interno.

Además, es necesario disponer de un sistema que se encargue de eliminar al exterior el **CO<sub>2</sub>** que se produce en las células.

La oxidación aeróbica de 1 mol de glucosa muestra que se producen 6 moles de CO<sub>2</sub> y se consumen 6 moles de O<sub>2</sub>.

La relación:

$$\text{CR} = \frac{\text{CO}_2 \text{ producido}}{\text{O}_2 \text{ consumido}}$$

se llama **cociente respiratorio** y, en el caso de la glucosa, es igual a **1**.

Un hombre, con alimentación mixta, tiene un cociente respiratorio de **0,825**, ya que las **aminoácidos** tienen un CR de **0,83** y los **ácidos grasos** uno de **0,71**.



Para el hombre, el **consumo de oxígeno** es del orden de los **250 ml de O<sub>2</sub> por minuto en reposo**.

**El aire tiene 20,98% de O<sub>2</sub>.**

Si su sistema respiratorio funcionara con un 100% de eficiencia, bastaría incorporar 1.250 ml de aire por minuto (que contienen los 250 mL de O<sub>2</sub> que necesita).

Esto no es así y el hombre realiza unas **12 inspiraciones y espiraciones por minuto** y en cada una se mueven unos **500 ml** de aire. Por lo tanto, en reposo, moviliza unos 6.000 ml/min de aire para obtener sus 250 ml de O<sub>2</sub> por minuto.

Como el **cociente respiratorio** es de 0,825; un hombre adulto debe eliminar  $(0,825 \times 250 \text{ ml}) = \mathbf{206 \text{ ml de CO}_2 \text{ por minuto}}$ .

**Sistema respiratorio:** aparato respiratorio, aparato cardiovascular y sangre

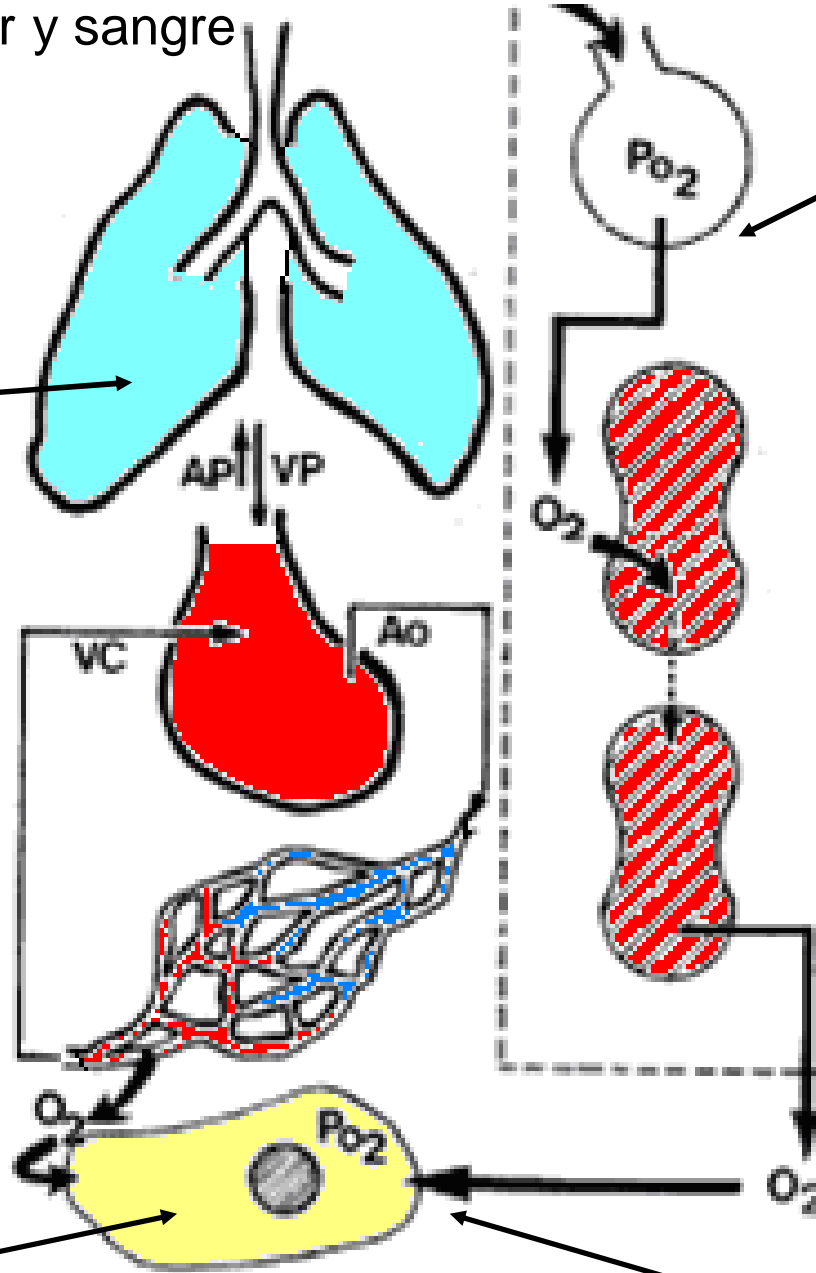
**Respiración externa:** intercambio de gas entre la sangre y el aire.

**Ventilación:**

Proceso de entrada y salida del aire en los pulmones

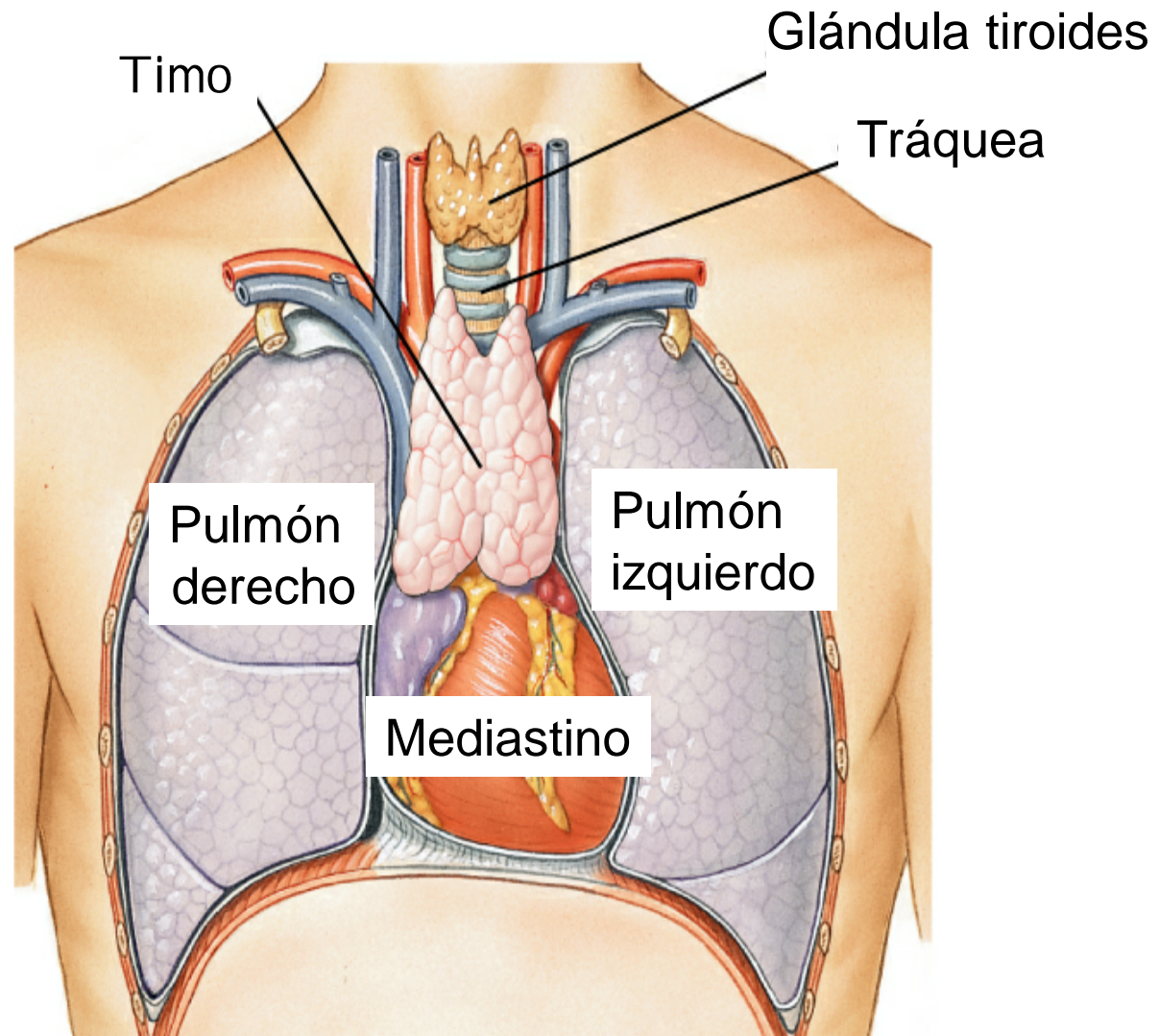
**Respiración celular:**

uso celular del  $O_2$  para el metabolismo y producción de  $CO_2$  como producto de desecho



**Respiración interna:** intercambio de gas entre la sangre y las células

## Cavidad torácica y pleuras



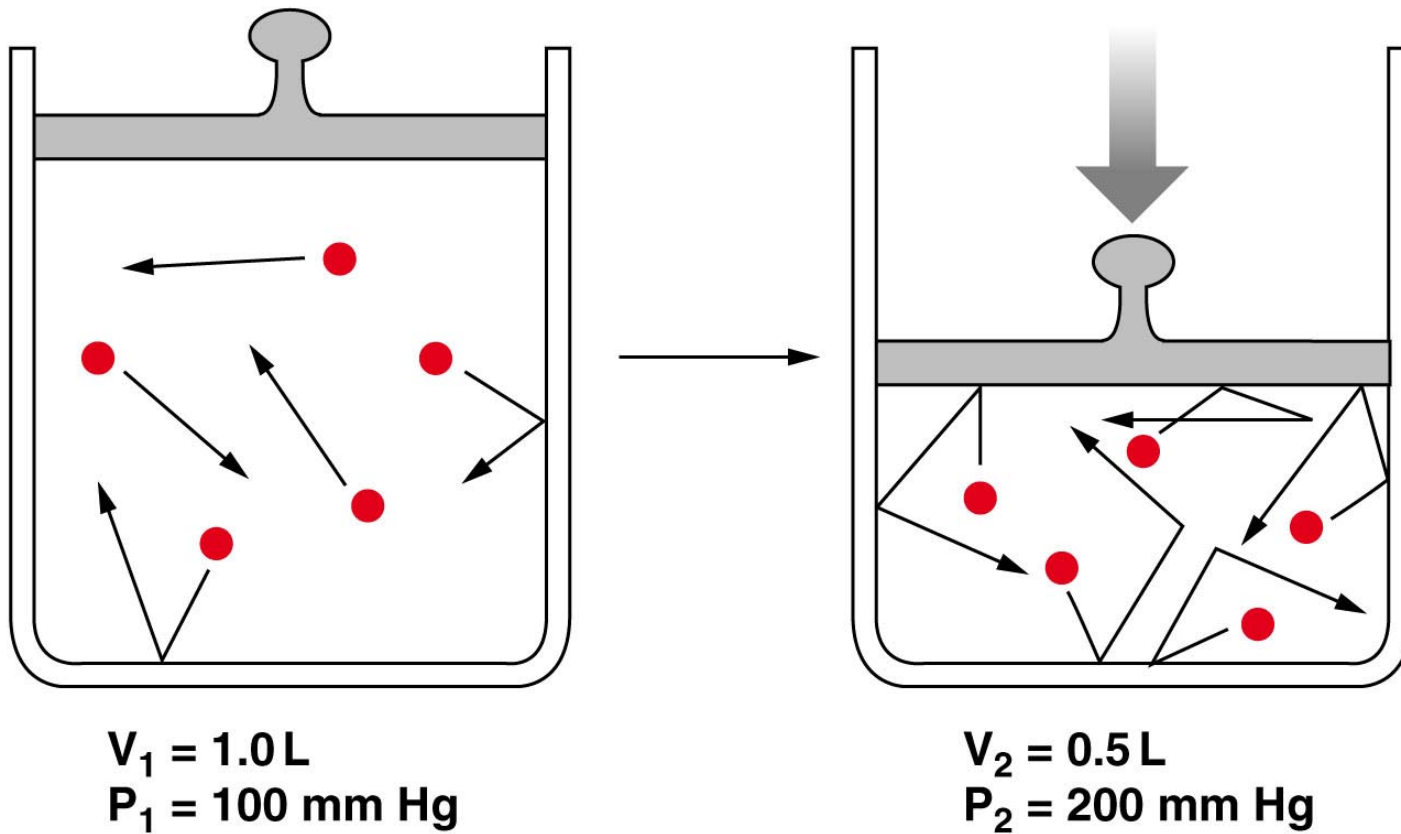
Cada pulmón está encerrado dentro de un saco pleural independiente.

¿Por qué ingresa aire  
a los pulmones?

## Ecuación general del estado gaseoso

$$PV = nRT$$

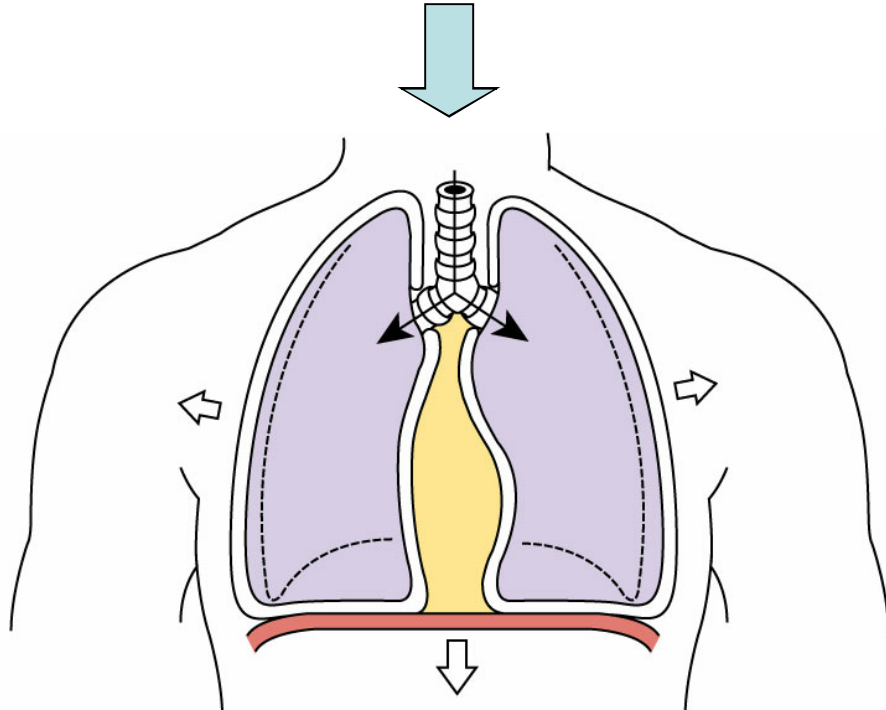
$$V = nRT \cdot 1/P$$







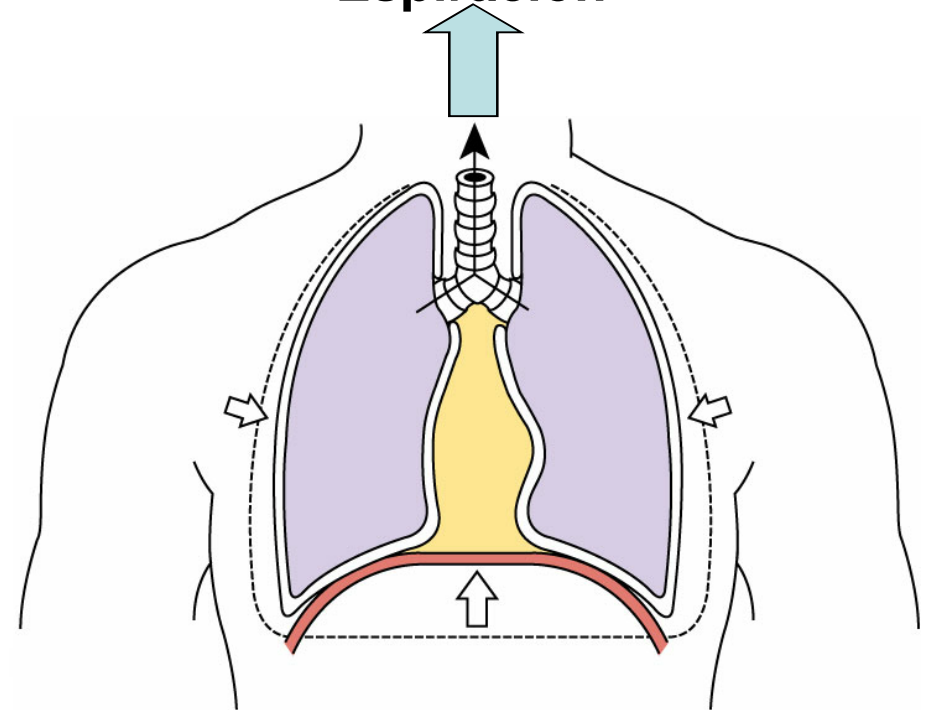
## Inspiración



Diafragma contraído  
el volumen torácico aumenta

La **inspiración** siempre es un  
movimiento **activo**

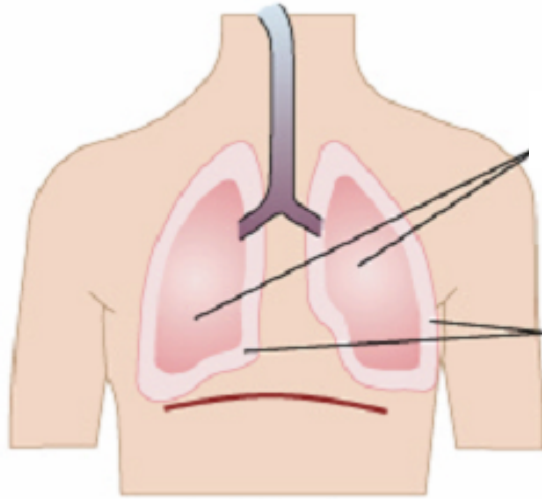
## Espiración



Diafragma relajado  
el volumen torácico disminuye

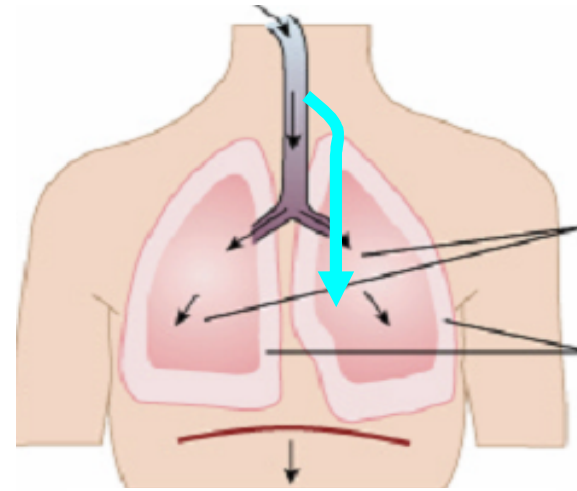
La **expiración** en general es un  
movimiento **pasivo**





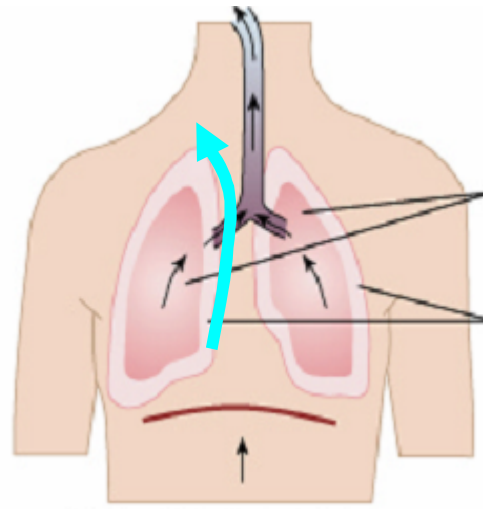
REPOSO

$P. \text{ alveolar} = P. \text{ atmosférica}$



INSPIRACION

$P. \text{ alveolar} < P. \text{ atmosférica}$



ESPIRACION

$P. \text{ alveolar} > P. \text{ atmosférica}$

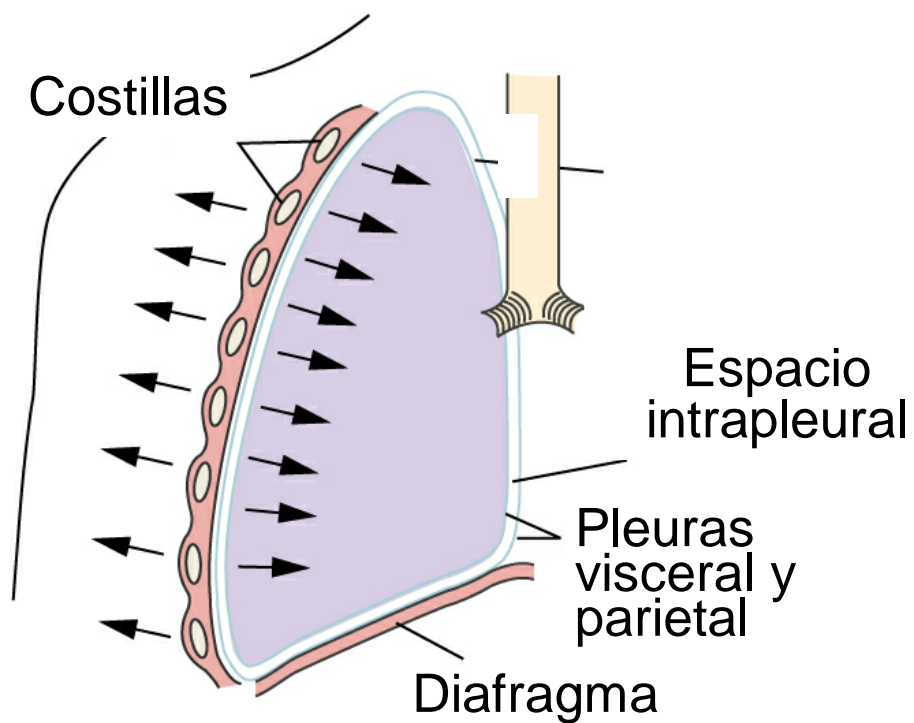
## Mecánica Respiratoria

En condiciones fisiológicas la respiración se realiza por **presión negativa**, que se origina por el descenso del diafragma generando en la cavidad pleural (que es una cavidad virtual) una presión sub-atmosférica que arrastra a los pulmones y ellos se expanden, por que en ellos también aparece una presión sub-atmosférica que induce la entrada de aire.

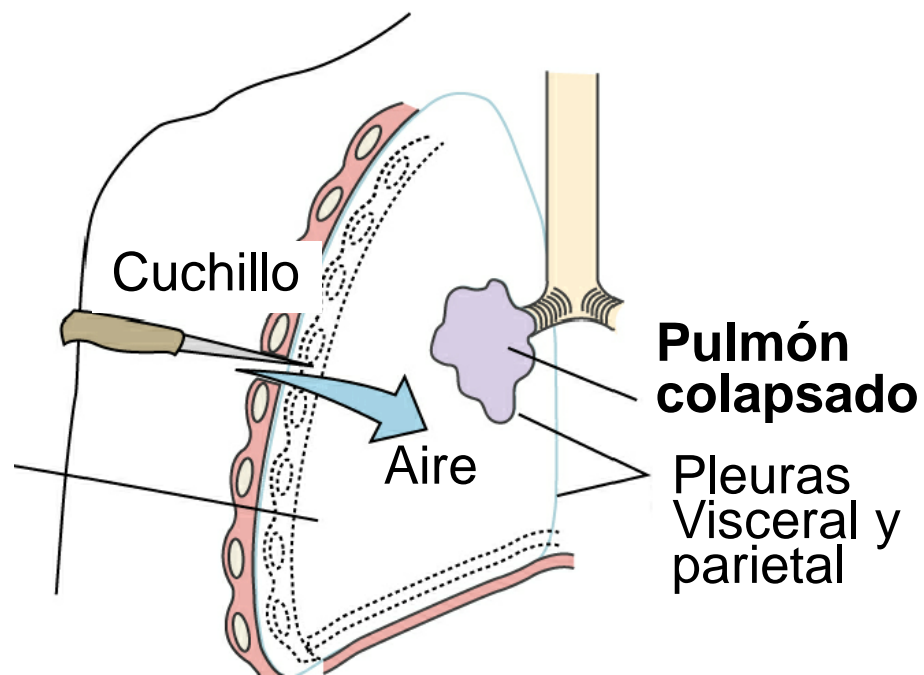
La **inspiración** es un **proceso activo** realizado por músculos, en tanto que la **espiración** es producida por la retracción elástica de los tejidos, por lo que se la califica de **pasiva**.

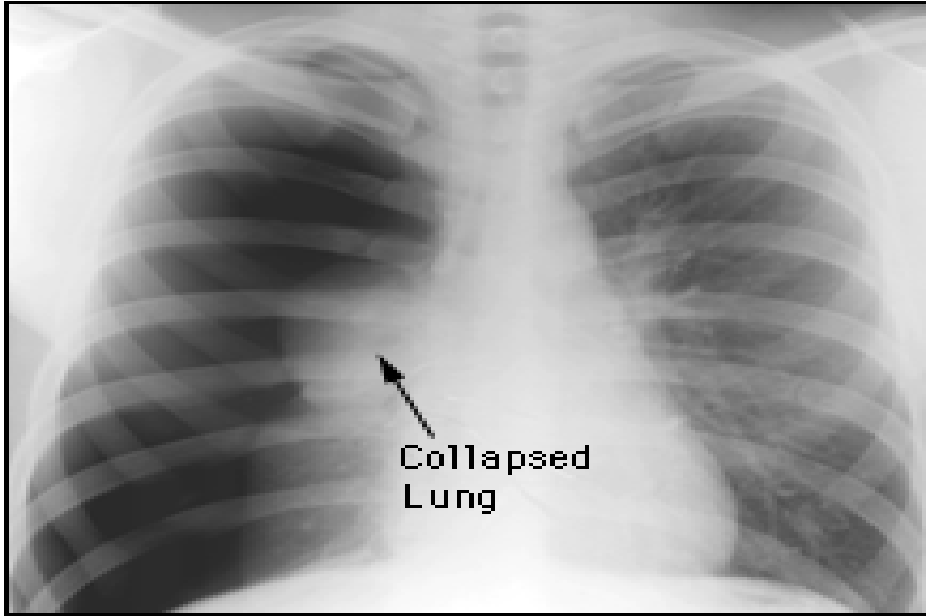
La integridad de la pleura es esencial para mantener expandidos los pulmones y para la mecánica ventilatoria

Pulmón normal

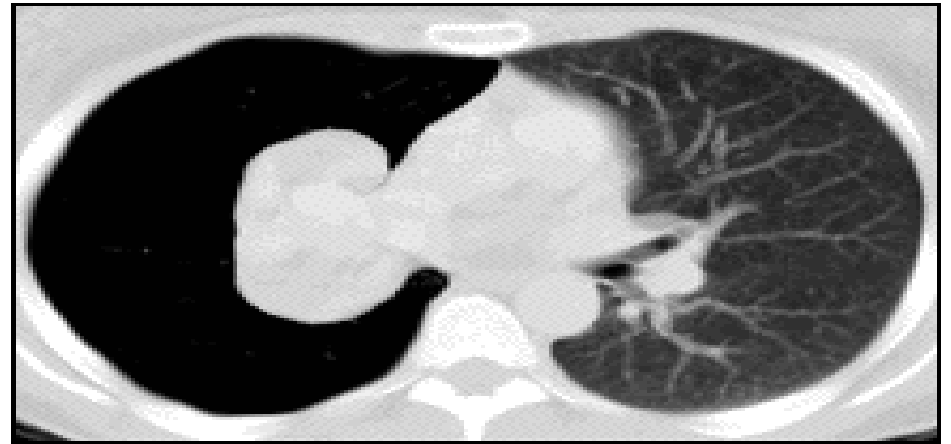


Neumotórax





Right lung pneumothorax - Radiograph



Right lung pneumothorax - CT

## Volumetría Pulmonar

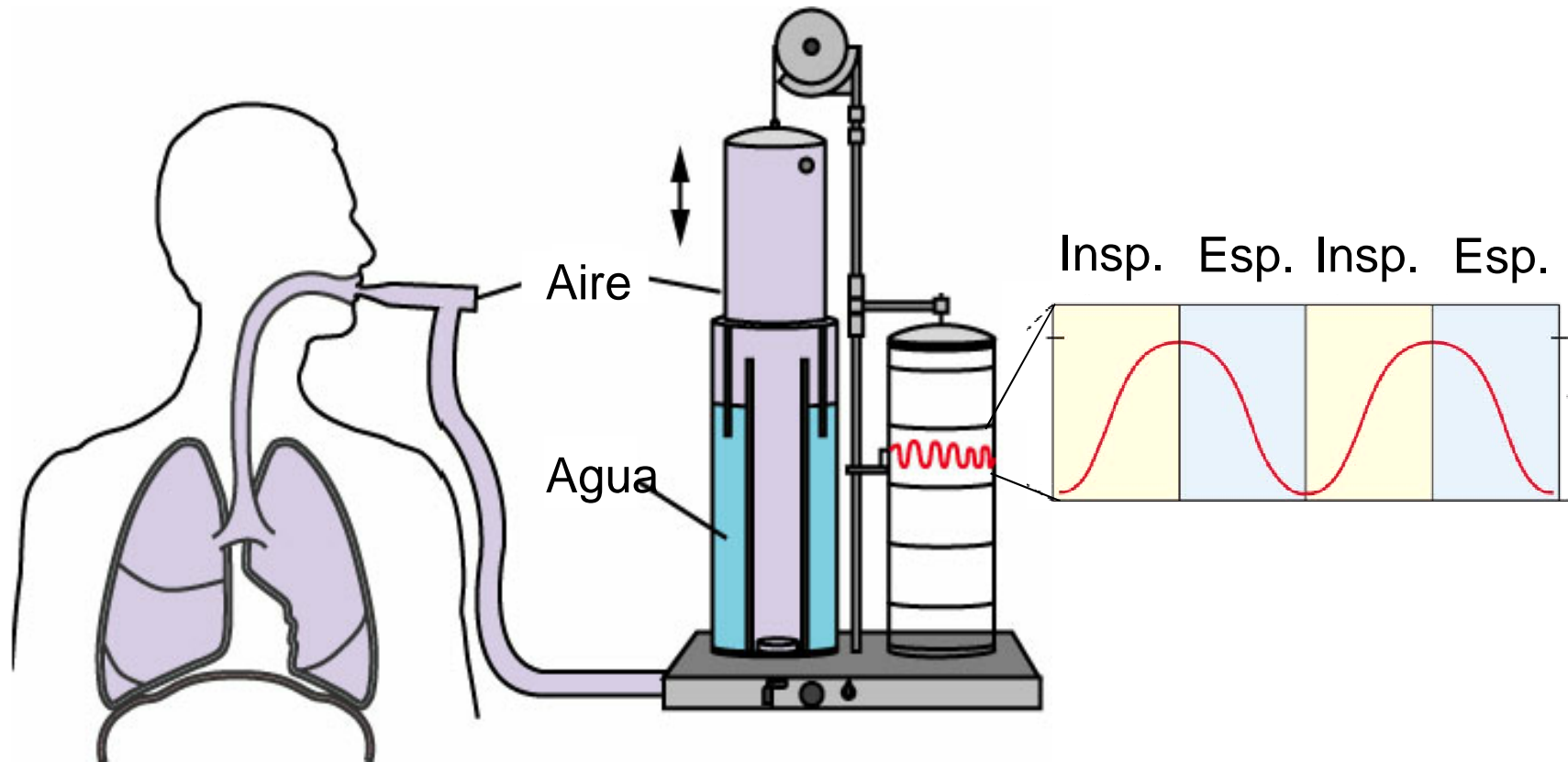
### Volúmenes y capacidades pulmonares

La **ventilación** es un proceso cíclico:

- con un movimiento **inspiratorio** (ingreso de aire a los pulmones) y
- uno **espiratorio** (egreso de aire de los pulmones).

El volumen de aire que se moviliza se denomina **volumen corriente** (VC) o **volumen ventilatorio** ( $V_V$ : 500 ml)

La **espirometría** es una técnica que mide los volúmenes y capacidades pulmonares



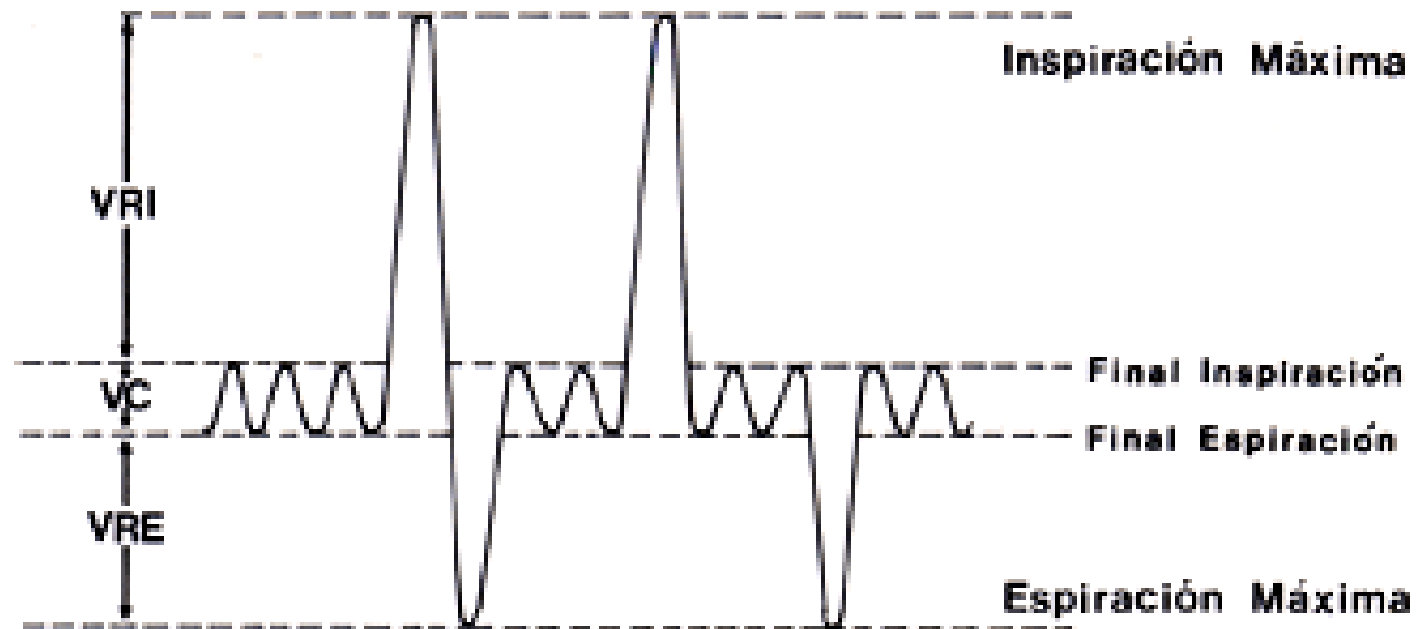


El volumen de aire que se moviliza se denomina **volumen corriente** ( $V_C$ ) o **volumen ventilatorio** ( $V_V$ : 500 ml)

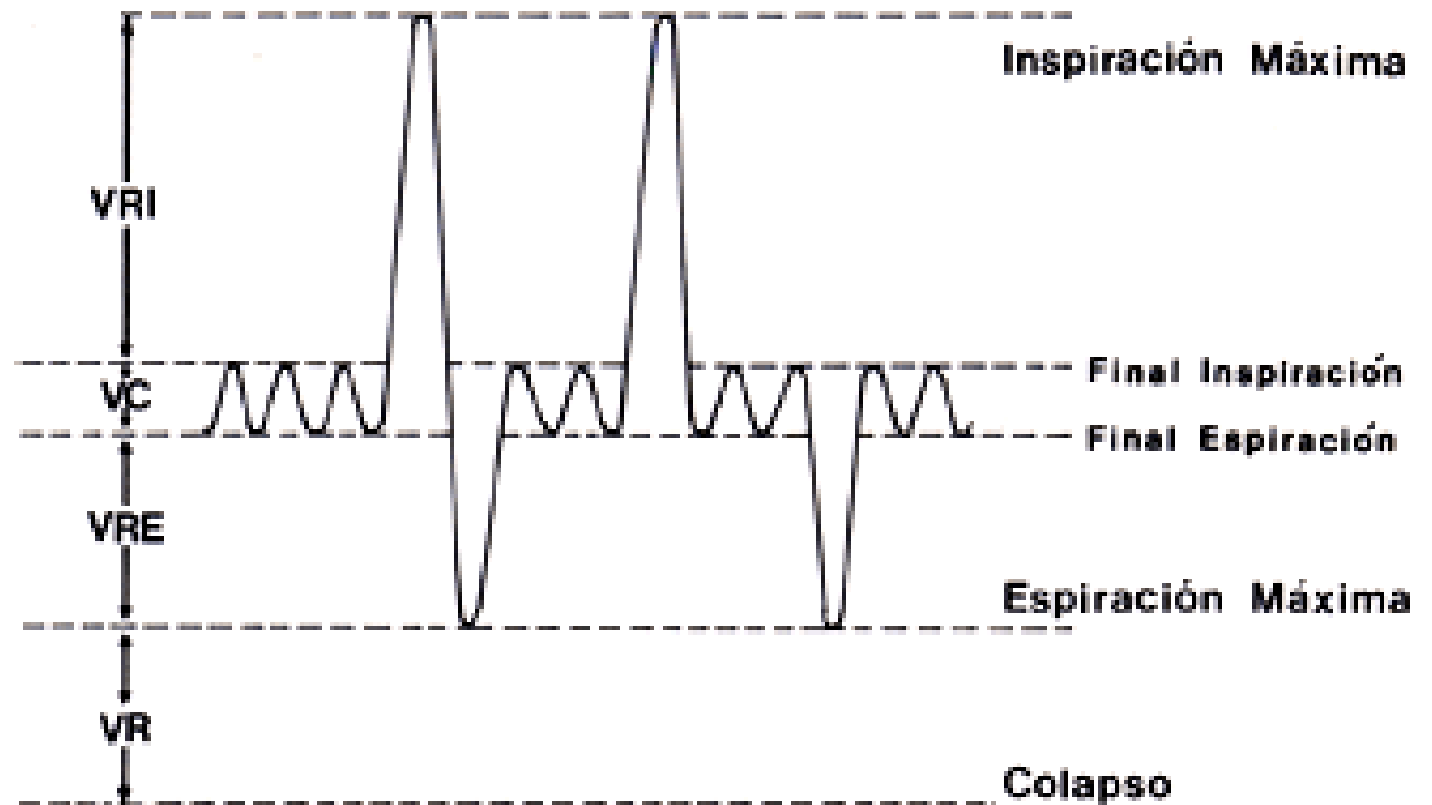


El volumen de aire que ingresa puede ser modificado voluntaria o involuntariamente gracias a que existe un **Volumen de Reserva Inspiratorio** (volumen de aire que puede ser inspirado forzadamente luego de una inspiración normal). VRI :3100 ml

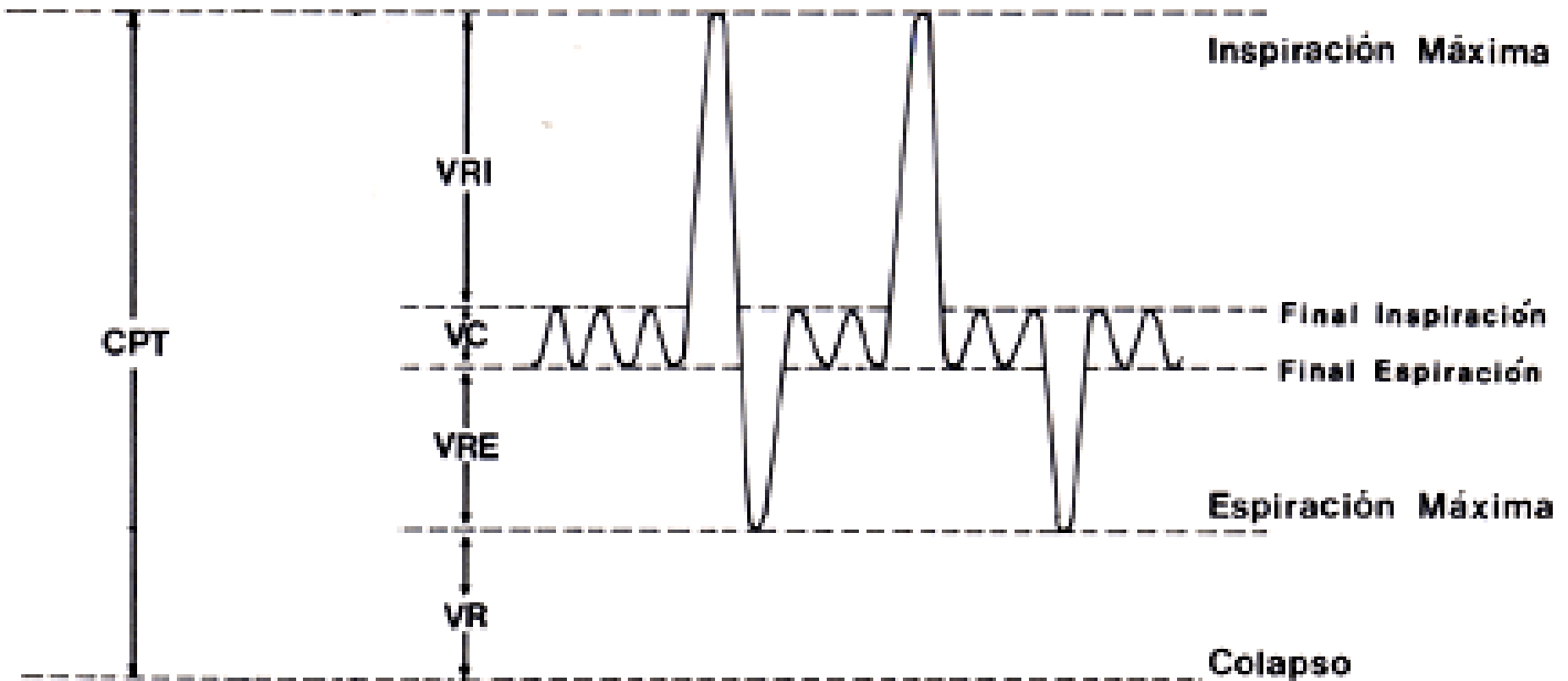




El volumen de aire que egresa también puede ser modificado voluntaria o involuntariamente gracias a que existe un **Volumen de Reserva Espiratorio** (volumen de aire que puede ser espirado forzosamente luego de una espiración normal). VRE: 1200 ml



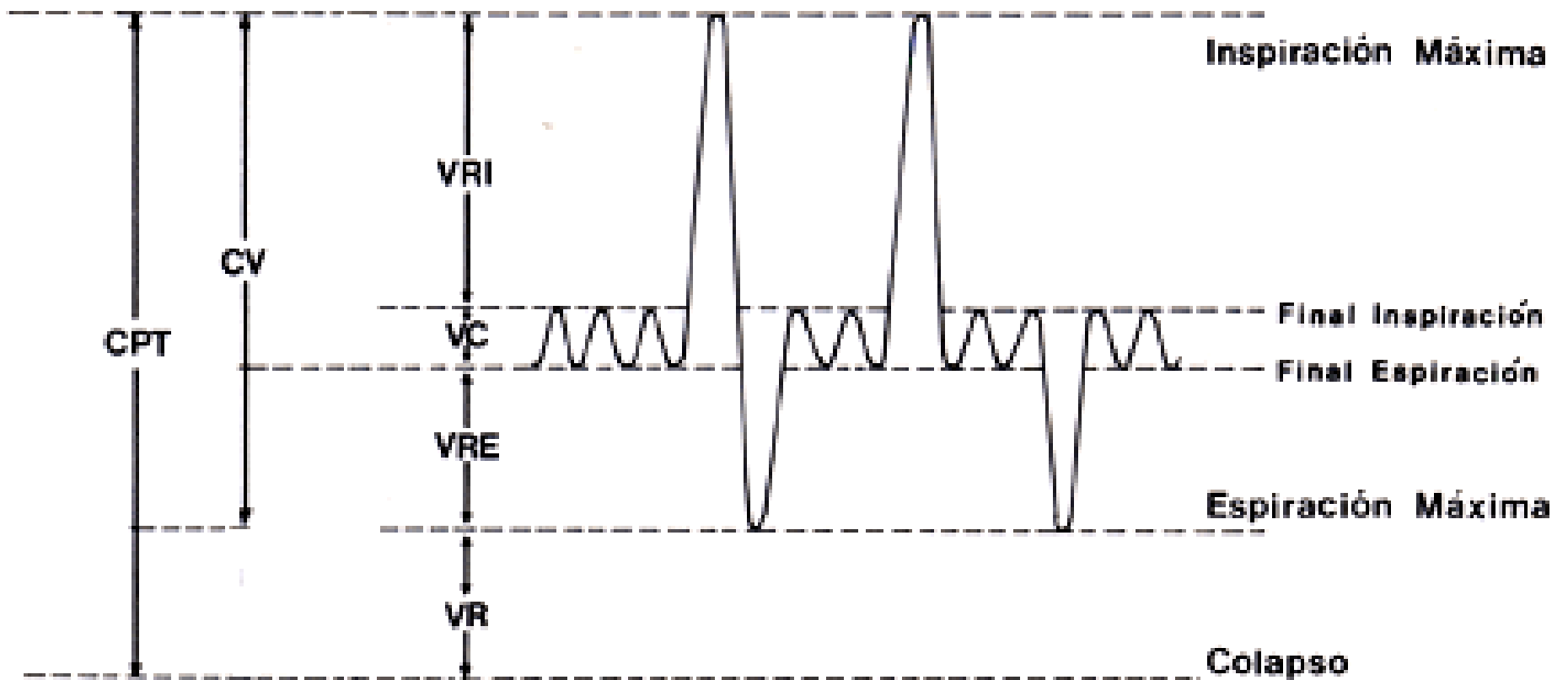
Cuando se elimina el VRE de los pulmones queda todavía un volumen de aire que no puede ser eliminado y se denomina **Volumen Residual**.  
 VR: 1200 ml.



Resulta conveniente reunir algunos de estos volúmenes en volúmenes mayores llamados **capacidades**. Las 4 capacidades fundamentales son:

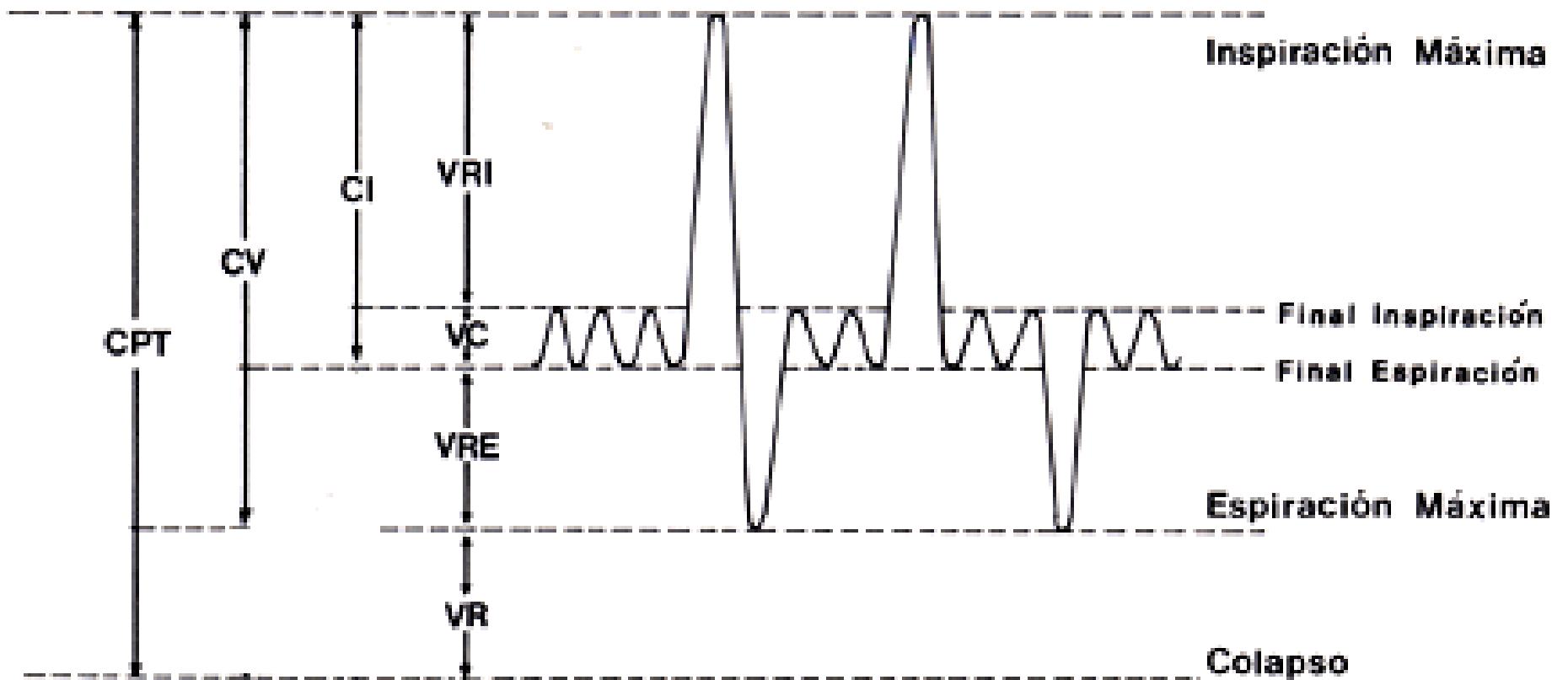
$$\text{Capacidad Pulmonar Total (CPT)} = \text{VRI} + \text{VV} + \text{VRE} + \text{VR} = 6000 \text{ ml}$$

Se define **CPT** como el volumen de aire que hay en los pulmones al final de una inspiración máxima.



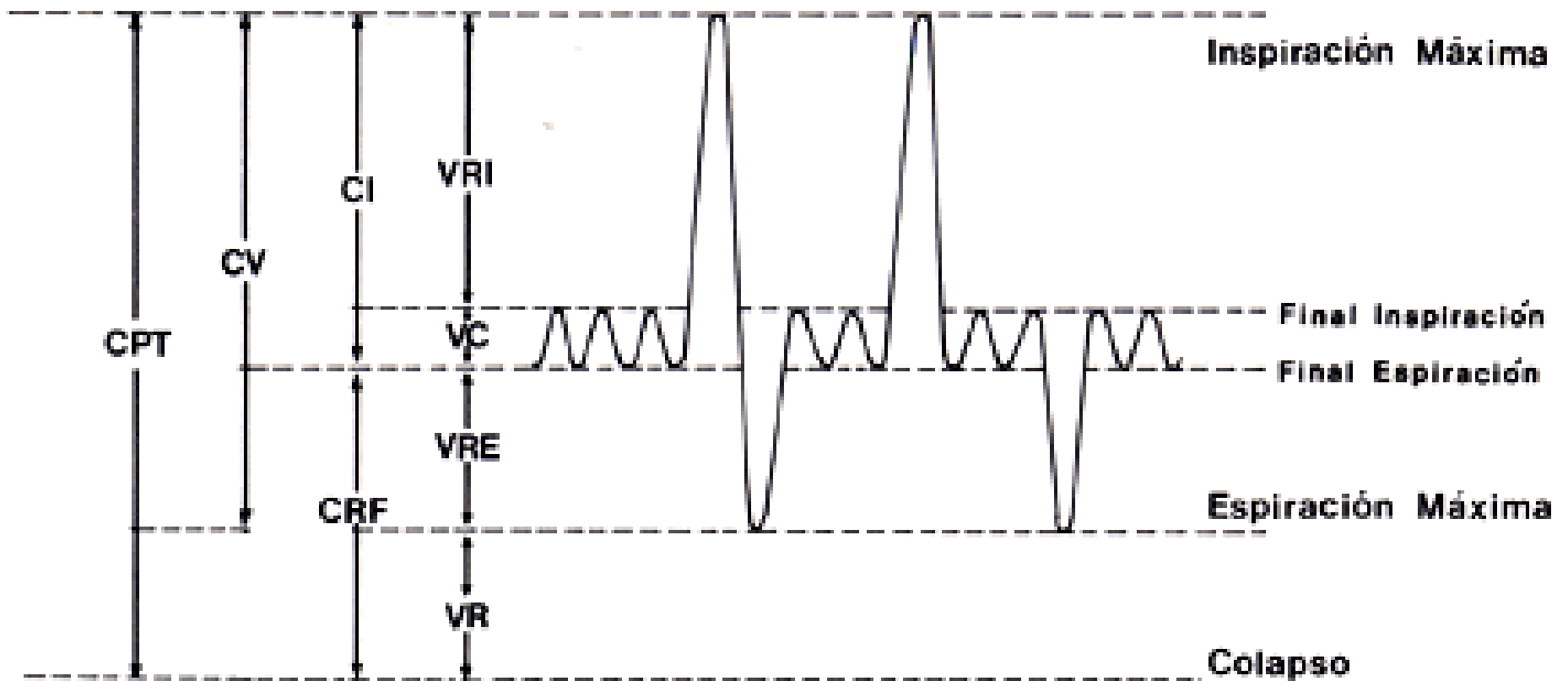
**Capacidad Vital (CV) = VRI + VV + VRE = 4800 ml**

Se define **CV** como la máxima cantidad de aire que se puede movilizar en un movimiento respiratorio.



**Capacidad Inspiratoria (CI) = VRI + VV = 3600 ml**

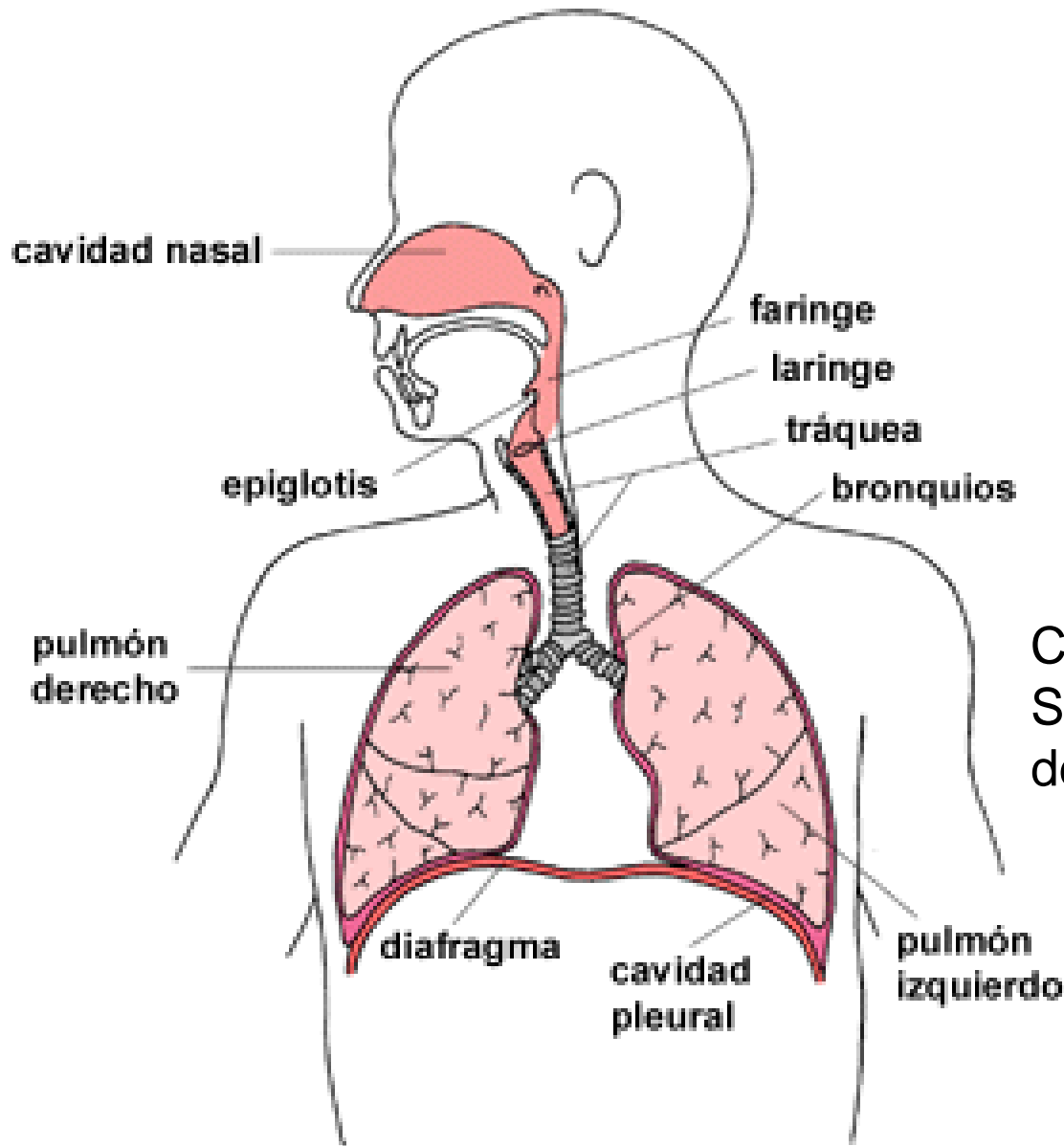
Se define **CI** como la máxima cantidad de aire que se puede inspirar luego de una espiración normal.



**Capacidad Residual Funcional (CRF) = VRE + VR = 2400 ml**

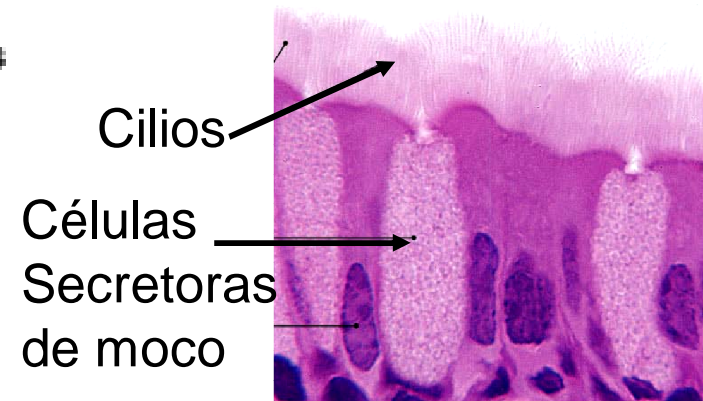
Se define **CRF** como el volumen de aire contenido en los pulmones luego de una espiración normal.

# Anatomía del sistema respiratorio



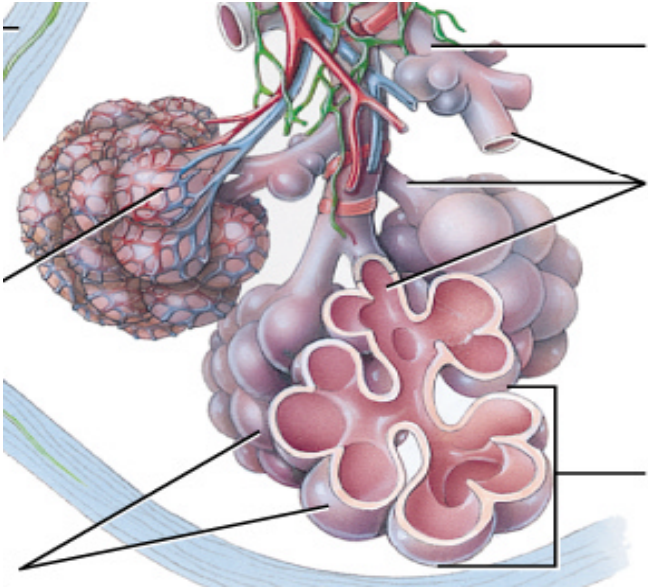
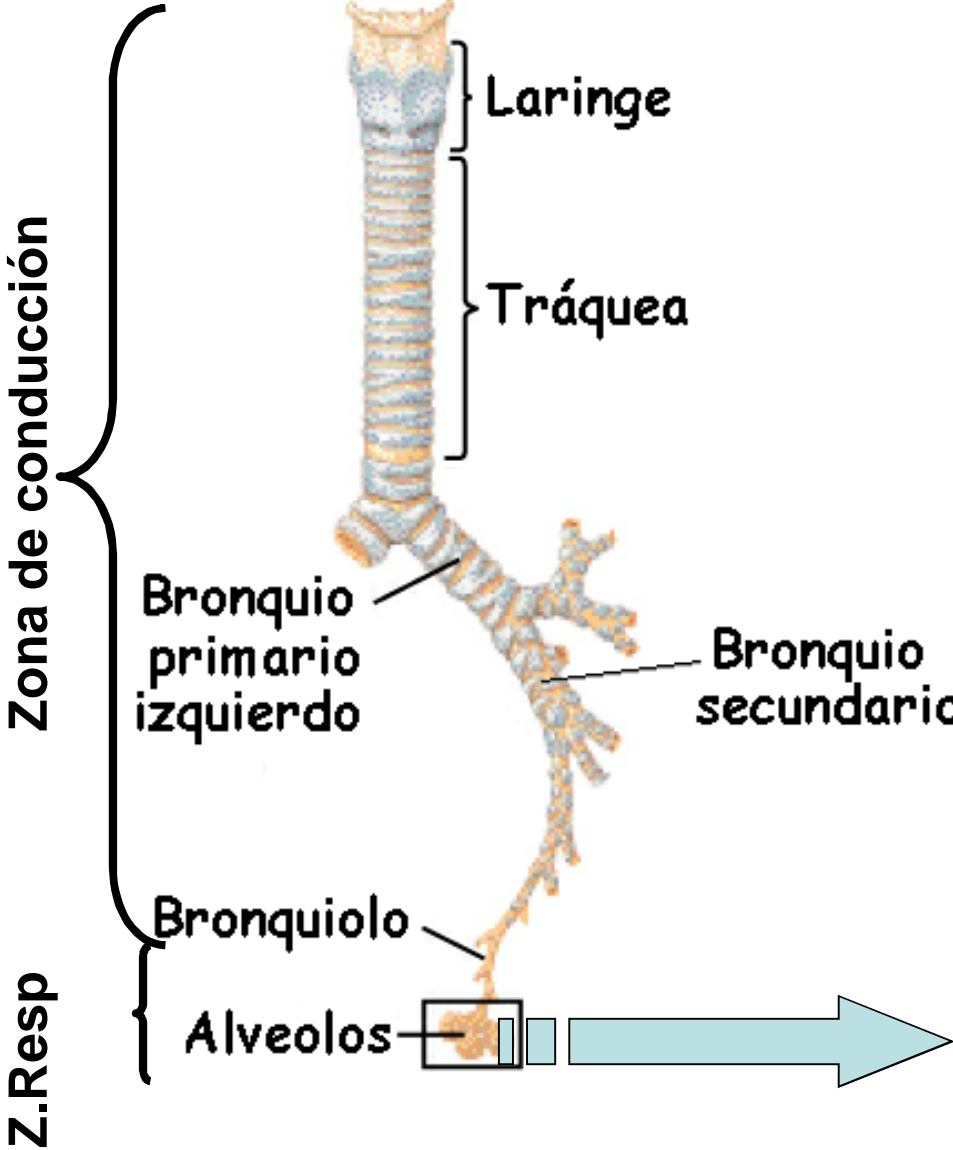
Zona de conducción:  
Función de calentar, limpiar,  
humedecer

Epitelio ciliado de la tráquea



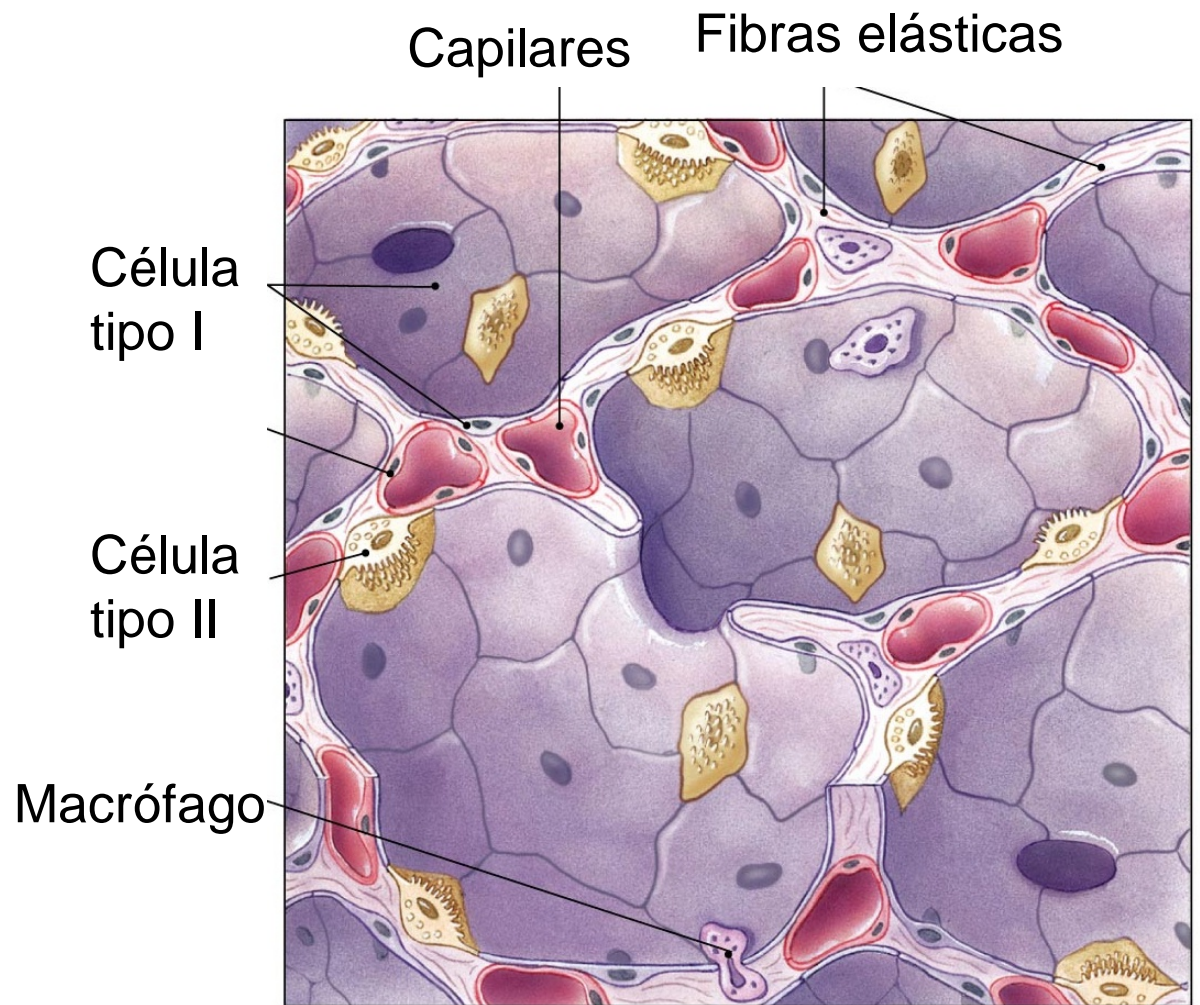
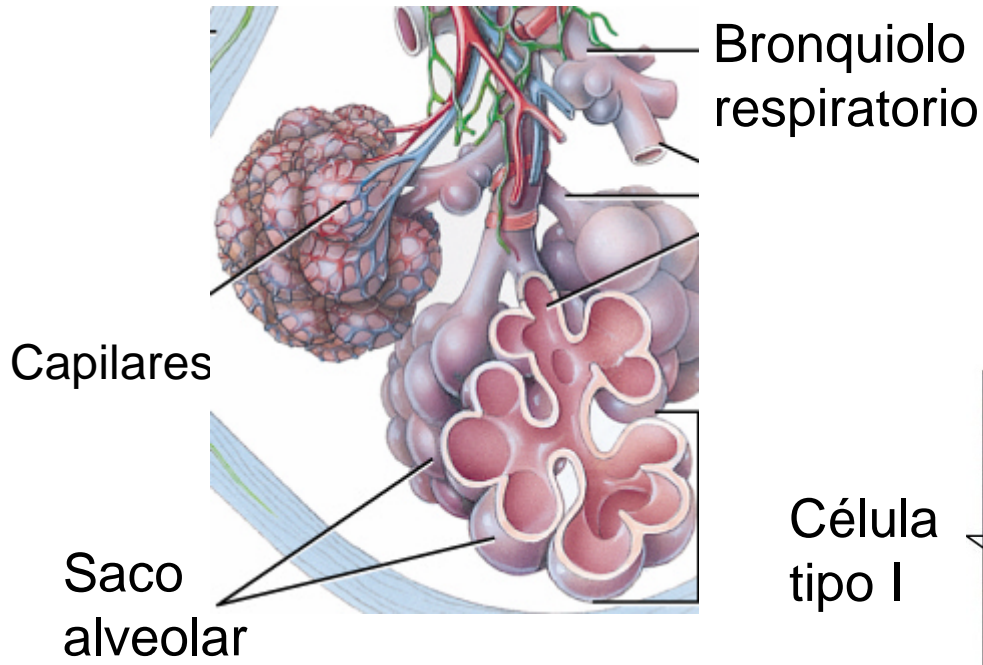
Zona respiratoria:  
Función de  
intercambio de gases

# Vías respiratorias

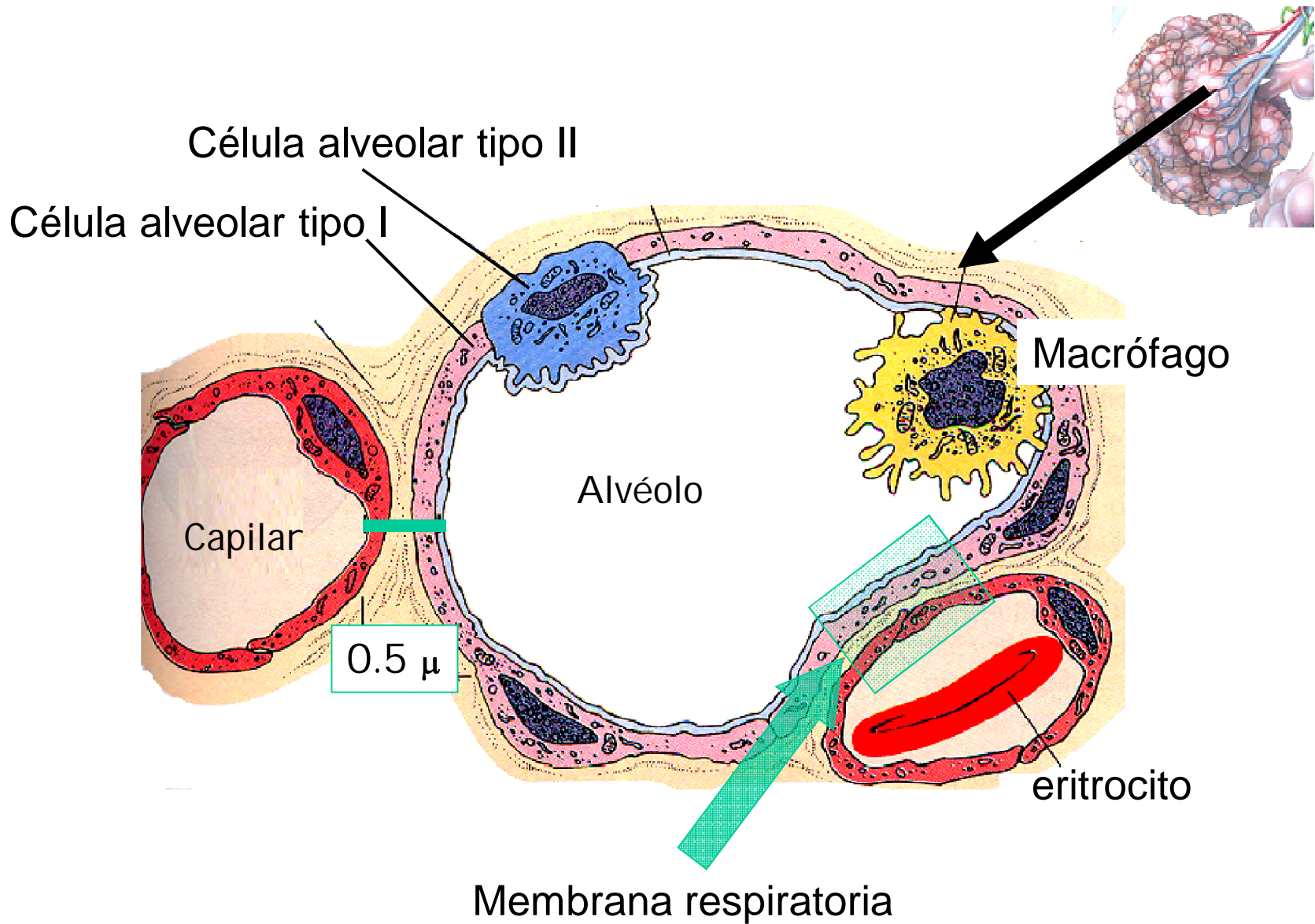


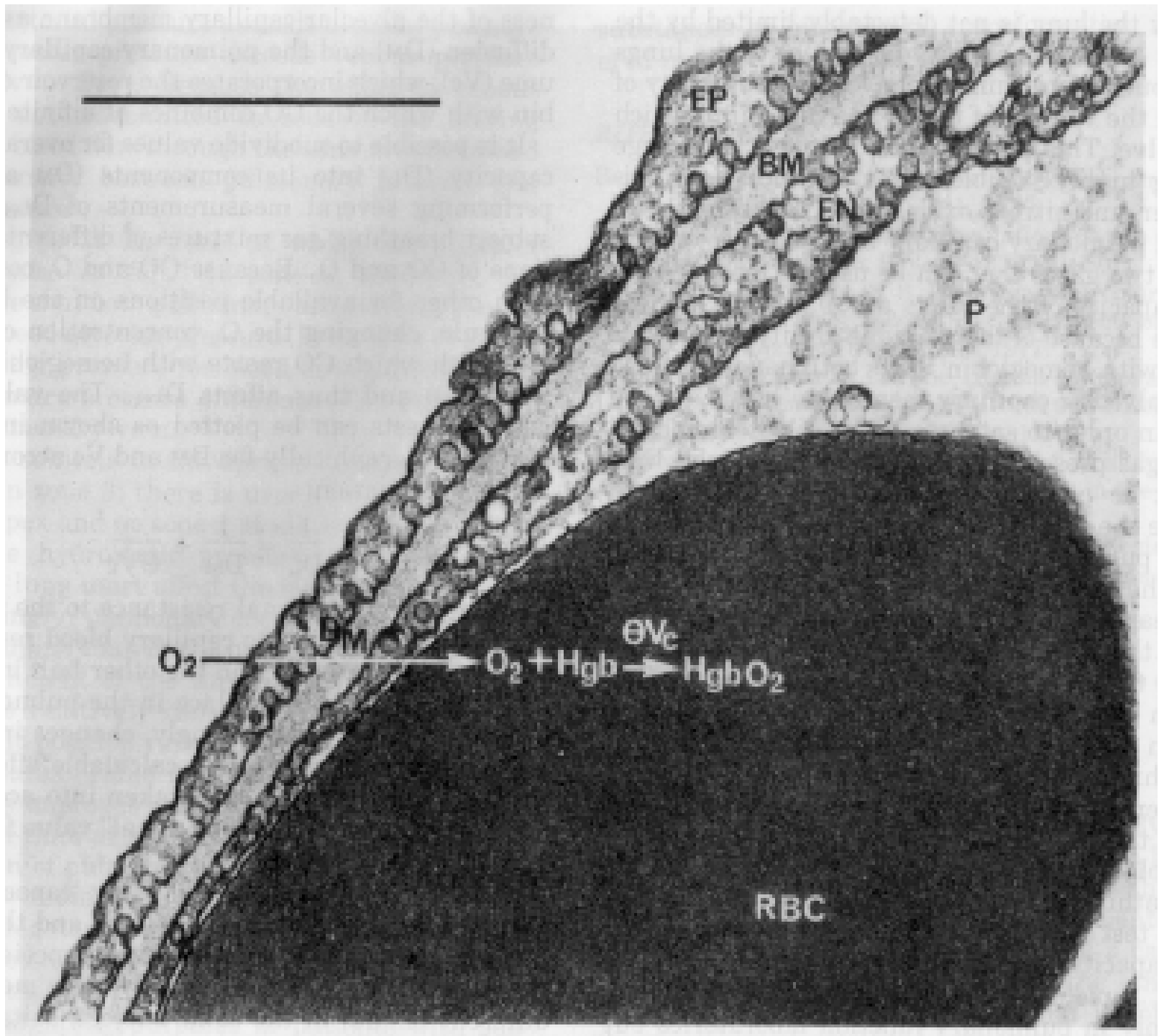


## Zona respiratoria: Alveolos



La unidad alveolo-capilar es el lugar donde se efectúa el intercambio de gases.





## **Ventilación Pulmonar**

La ventilación pulmonar es la cantidad de aire que movilizan los pulmones por minuto.

Ventilación pulmonar =  $V_V \times$  frecuencia respiratoria

## Ventilación alveolar y espacio muerto

Las regiones que no realizan hematosis constituyen el llamado **espacio muerto anatómico**, y al volumen de aire contenido en él se lo denomina volumen del espacio muerto.

La **ventilación alveolar** (aire que sí realiza hematosis) será:

$$\text{Ventilación alveolar} = (\text{VV} - \text{Vol. del Esp. Muerto}) \times \text{frec. Resp.}$$

Existe otro espacio muerto, el **espacio muerto fisiológico** que se genera cuando los alvéolos, por alguna razón no reciben la adecuada cantidad de sangre y por lo tanto la hematosis es nula o ineficiente.

El **espacio muerto funcional** es la suma del espacio muerto anatómico y del espacio muerto fisiológico y representa aproximadamente un 20 a un 30% del VV.

**Resistencias  
que se oponen  
a la ventilación**

**Resistencia  
elástica**

- 1- Distensibilidad pulmonar**
- 2- La tensión superficial en la superficie alveolar**
- 3- Distensibilidad del tórax**
- 4- Distribución de aire en los pulmones**

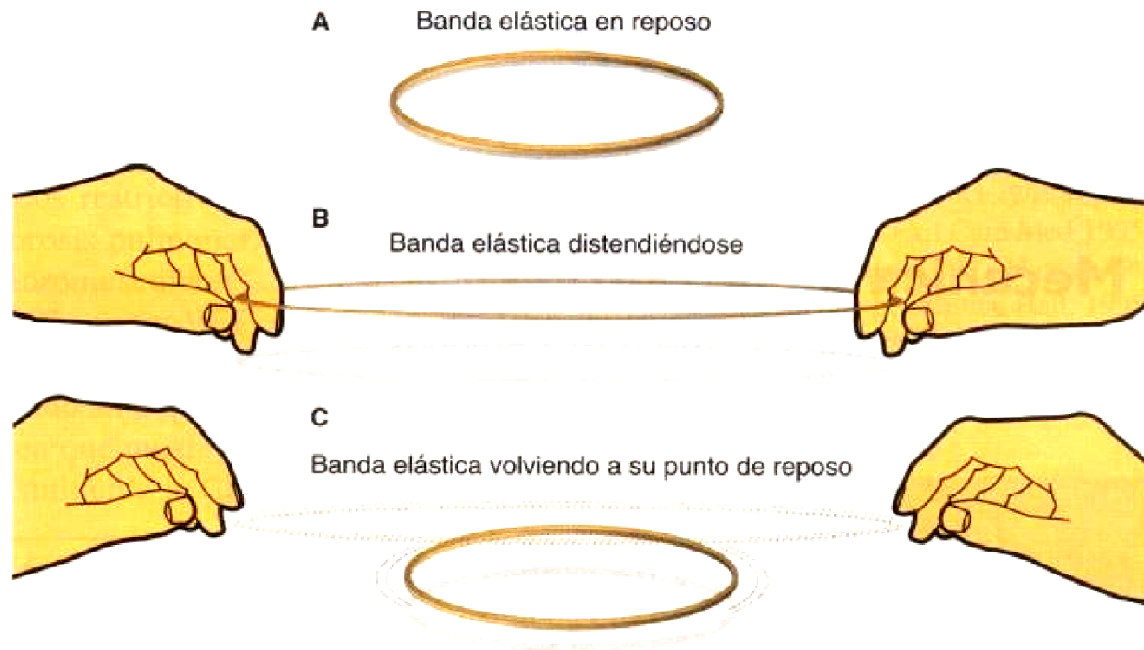
**Resistencia  
de la vías aéreas**

# Resistencia elástica

## 1- Distensibilidad pulmonar:

Todos los cuerpos tienen una propiedad llamada **elasticidad** (*propiedad de un cuerpo de volver a su estado inicial luego que ha desaparecido la fuerza que lo deformaba*).

Su valor es una constante siempre que el estudio no se realice cerca del límite de ruptura del mismo.



En el caso de los pulmones es más útil evidenciar la **distensibilidad** en lugar de su **elasticidad**, por lo que se invierte la relación y resulta:

**Distensibilidad = grado de distensión / fuerza**

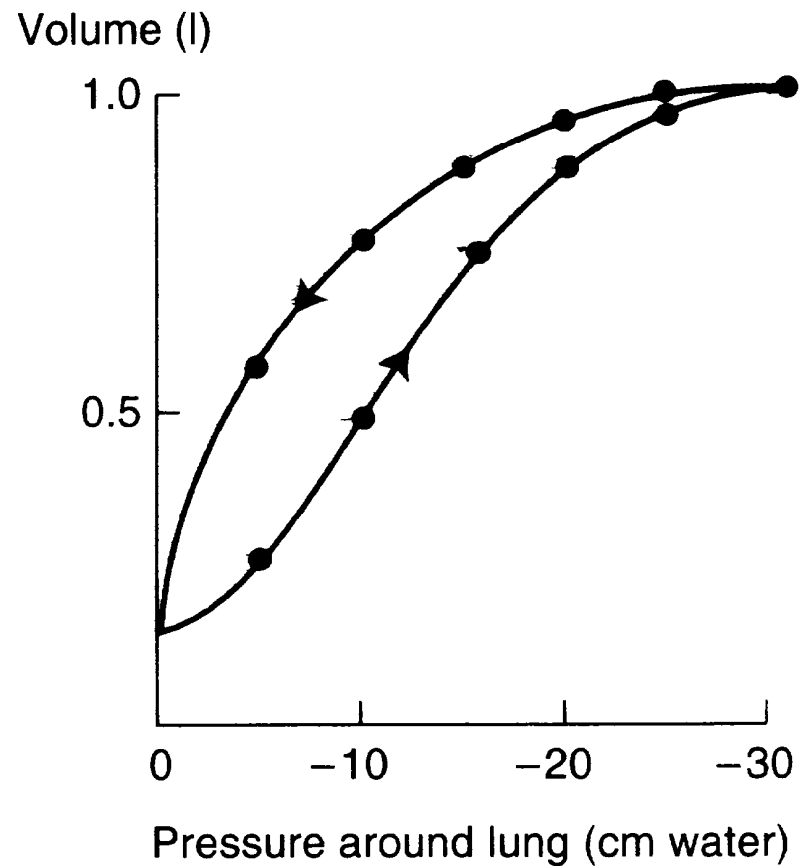
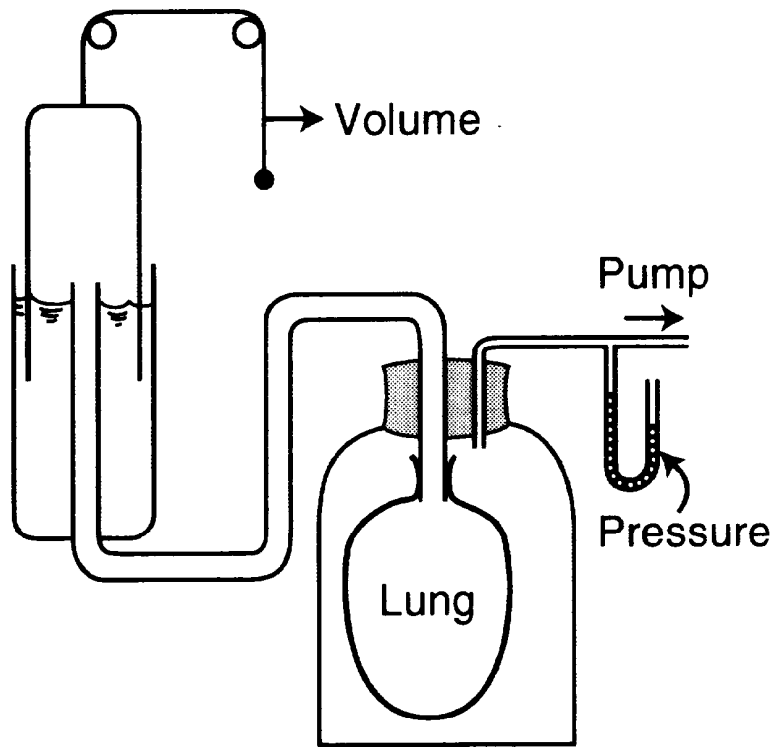
La medida de la distensibilidad pulmonar es un dato útil en medicina, pues informa sobre el estado de las paredes del órgano.

La **distensibilidad** también se la conoce con la palabra inglesa **compliance**.

$$\text{Compliance} = \frac{\Delta V}{\Delta P}$$



Si se aíslan los pulmones del tórax y se les introducen cantidades conocidas de aire y se miden las presiones que se generan, se obtiene una gráfica como la siguiente:



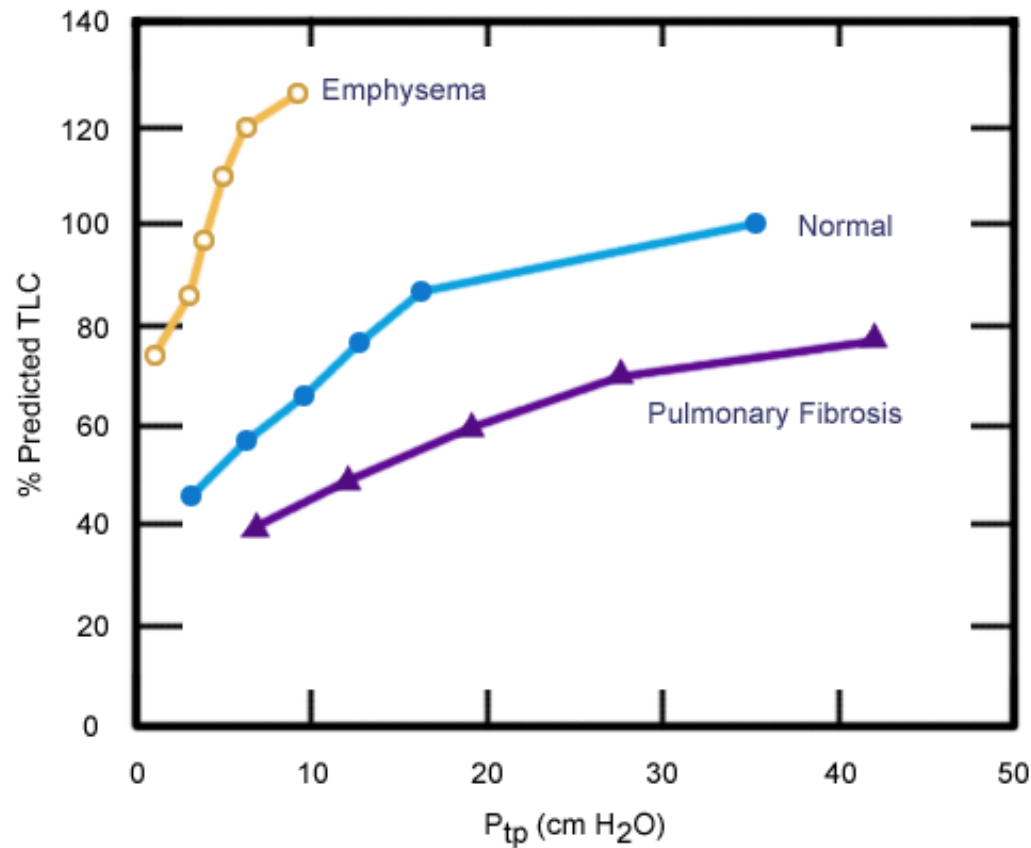
## Factores que afectan a la compliance

Disminución en la Compliance

- Fibrosis: cicatrices en el intersticio.
- Falta de surfactante pulmonar

Aumentos en la Compliance

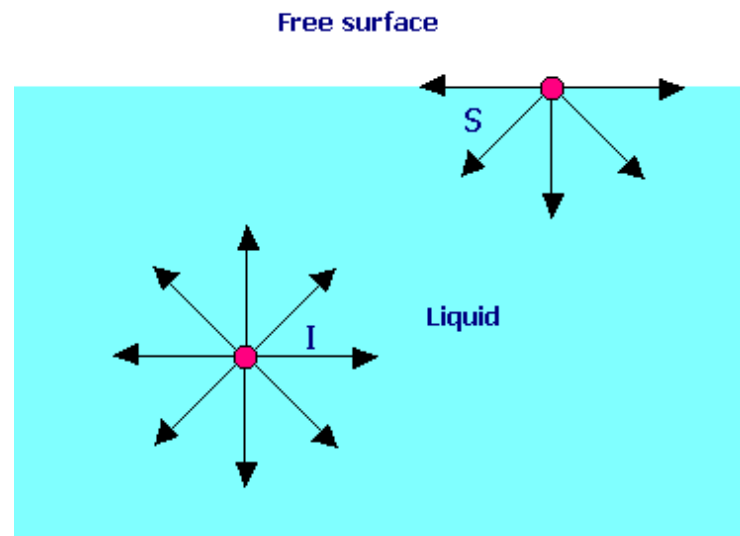
- Edad
- Enfisema Pulmonar



## 2- La tensión superficial en la superficie alveolar

Las fuerzas de cohesión en el interior de una masa líquida están balanceadas. Pero las que están en la superficie, en contacto con el aire, son atraídas con mucha mayor intensidad hacia el interior que por las moléculas de aire.

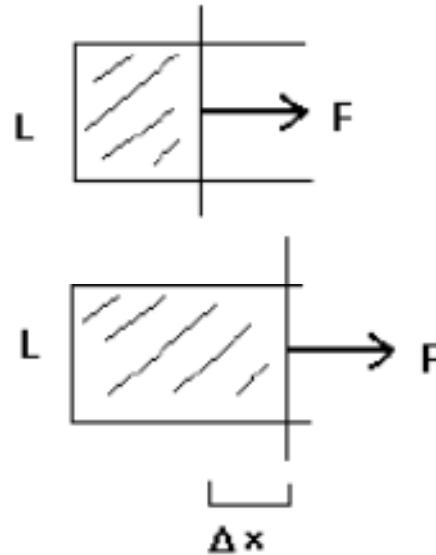
Dicha fuerza de “compresión” es lo que se denomina **tensión superficial**.



Se define a la tensión superficial de un líquido como **la fuerza en dinas que actúa sobre la superficie de un líquido, por cm de longitud.**

La tensión superficial se representa con el símbolo  $\gamma$ . Su valor es el mismo en cualquier punto y en todas las direcciones a lo largo de la superficie del líquido

La **tensión superficial** de una interfase determina el **trabajo** que hay que realizar para incrementar el área de la interfase.



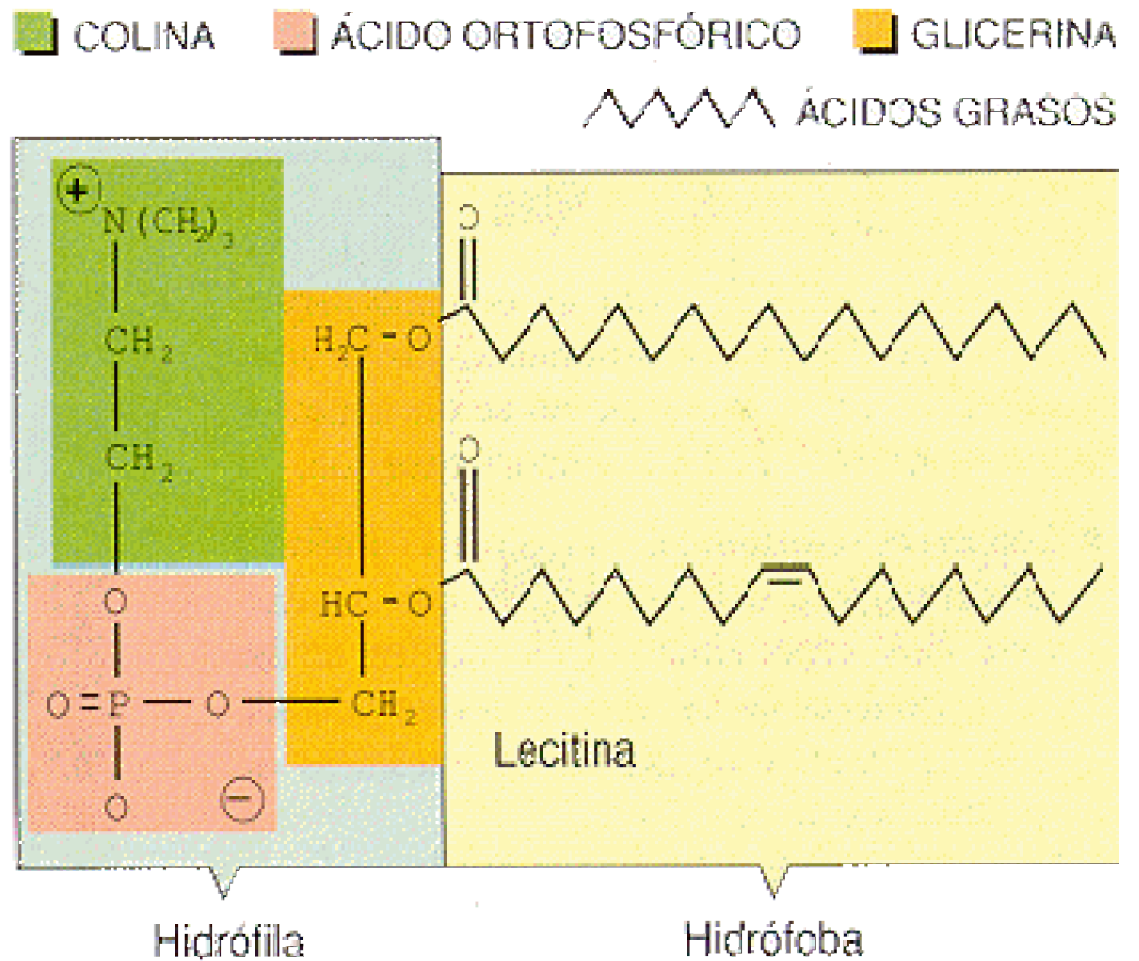
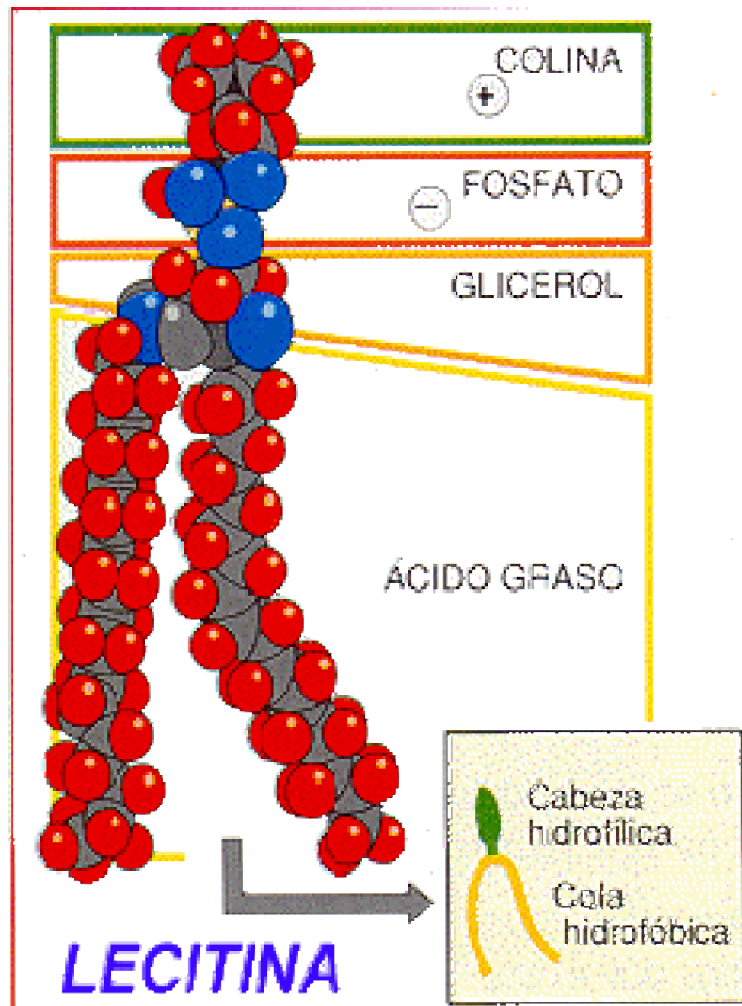
Como en este caso hay dos interfases (una de cada lado del marco), la tensión superficial genera una fuerza  $\mathbf{F} = 2 \gamma \mathbf{L}$ . Si se desea aumentar la superficie desplazando la varilla una distancia  $\Delta x$ , se requiere un trabajo  $\mathbf{W} = \mathbf{F} \Delta \mathbf{x}$ , o (reemplazando)  $\mathbf{W} = 2 \gamma \mathbf{L} \Delta \mathbf{x}$ .

Para el agua a 37 °C,  $\gamma = 70$  dina/cm.

Para el plasma  $\gamma = 50$  dina/cm (por su contenido de proteínas).

Para la superficie alveolar  $\gamma = 25$  dina/cm, debido a la existencia del llamado **surfactante pulmonar**.

El principal componente activo del surfactante pulmonar es la **dipalmitílfosfatidilcolina**.



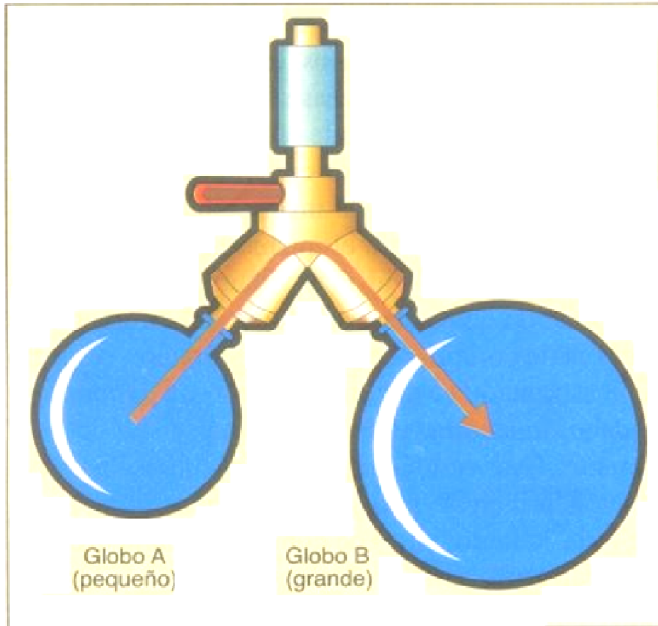
La  $\gamma$  del líquido alveolar no es constante.

Varía con el área.



## ¿Qué ocurriría si la tensión superficial fuese constante?

- Se requeriría un enorme esfuerzo inspiratorio para insuflar los alvéolos al principio, cuando el radio es menor.
- Aún con ese gran esfuerzo, sólo se dilatarían los alvéolos de mayor tamaño ya que serían los de menor presión interna.
- Los alvéolos menores se vaciarían en los alvéolos grandes ya que se comunican entre ellos por los poros de Kohn y los canales de Lambert.



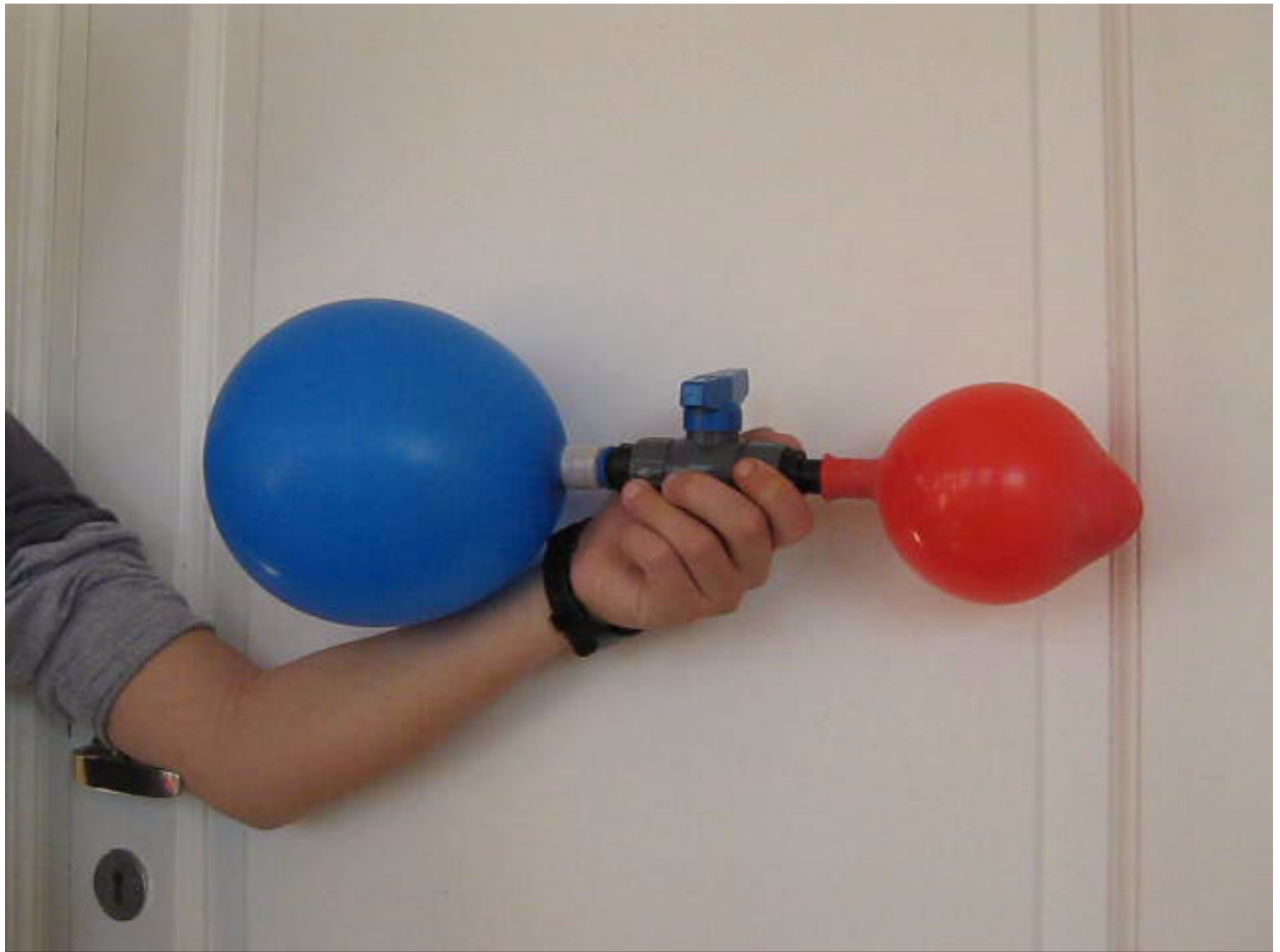
La **ley de Laplace** establece la relación existente entre la presión (P), la Tensión (T) y el radio (r) en una burbuja:

$$P = 4T / r$$

Al tener el alvéolo sólo la superficie interna en interfase gas-líquido, la **ley de Laplace** se reduce a:

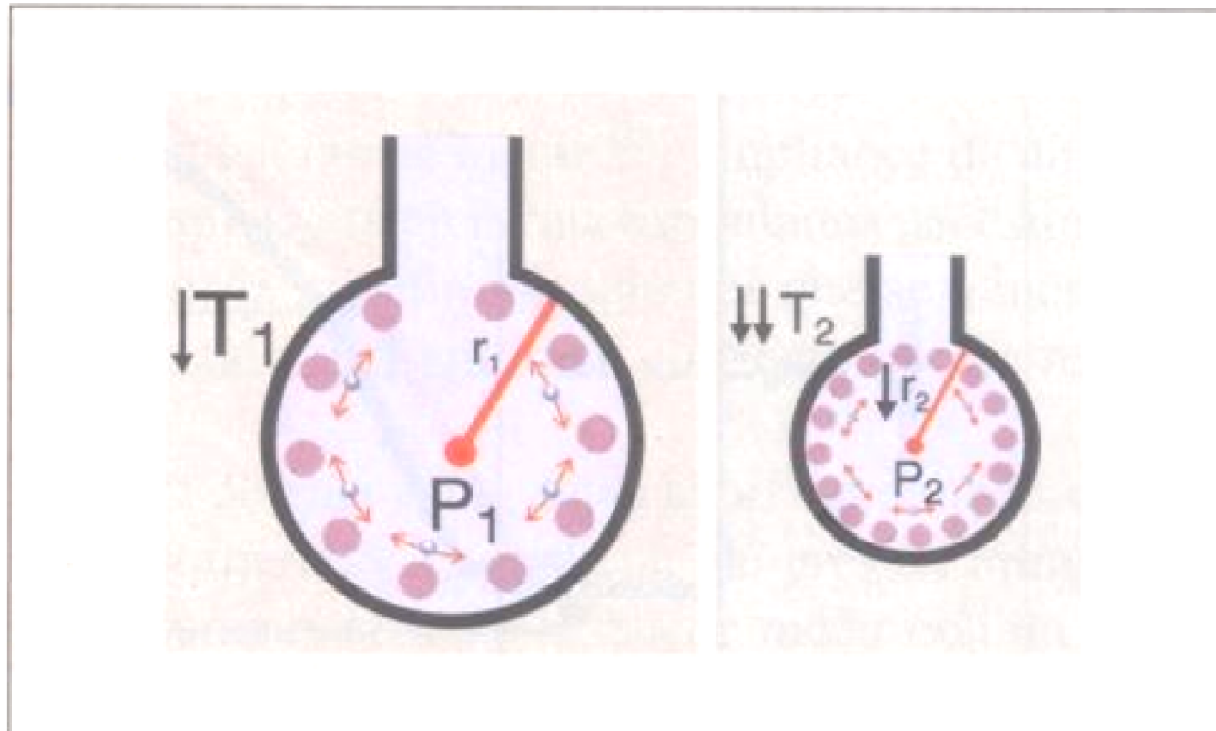
$$P = 2T / r$$

La ley de Laplace predice que la presión sería mayor en los alvéolos de menor radio.

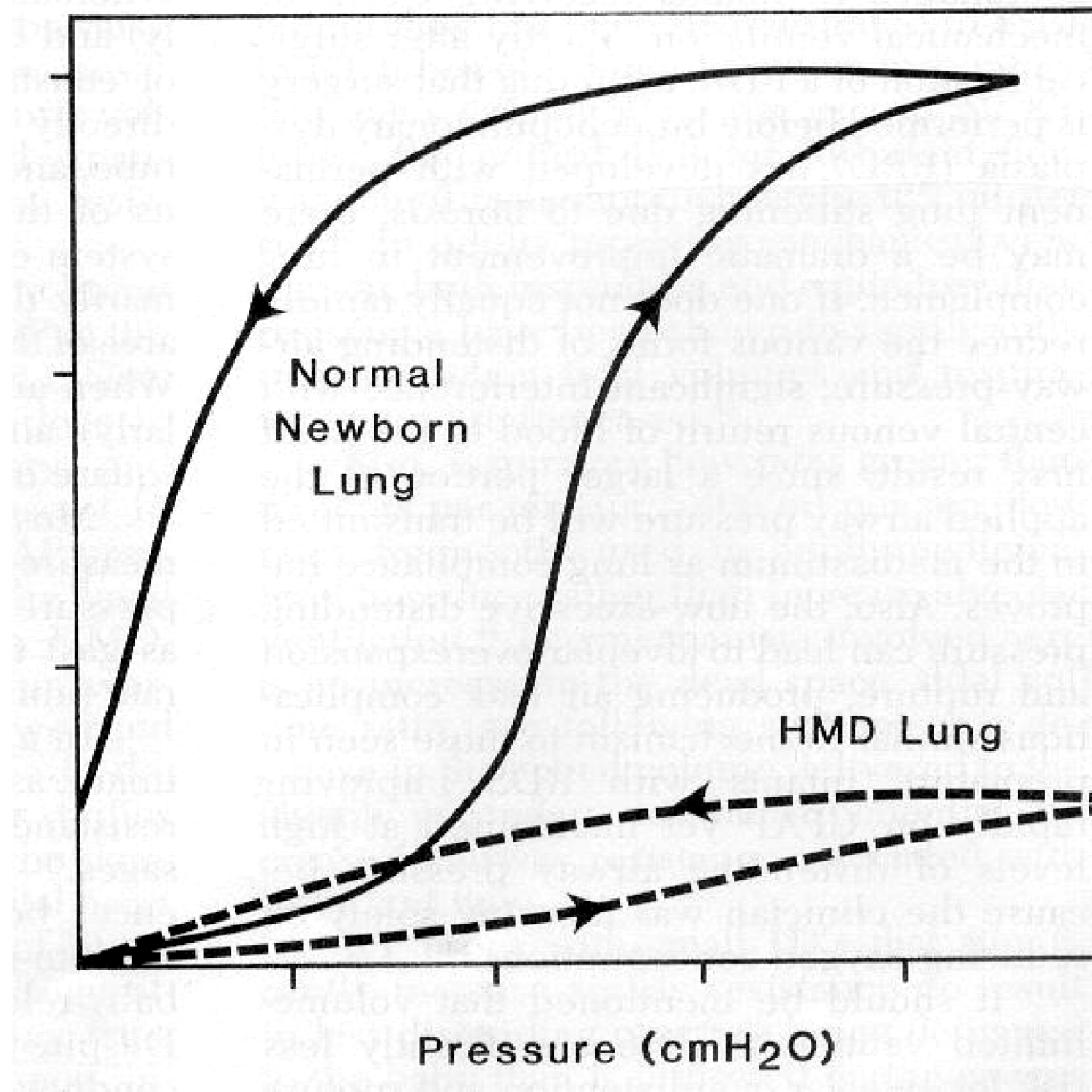


Al ser el surfactante un factor de superficie, su concentración (y por lo tanto su acción) aumenta cuando el radio disminuye.

Es decir, que al disminuir  $r$  disminuye  $T$ , manteniendo  $P$  constante.

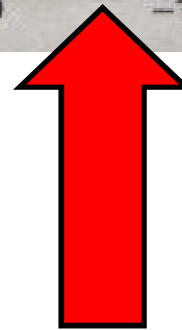
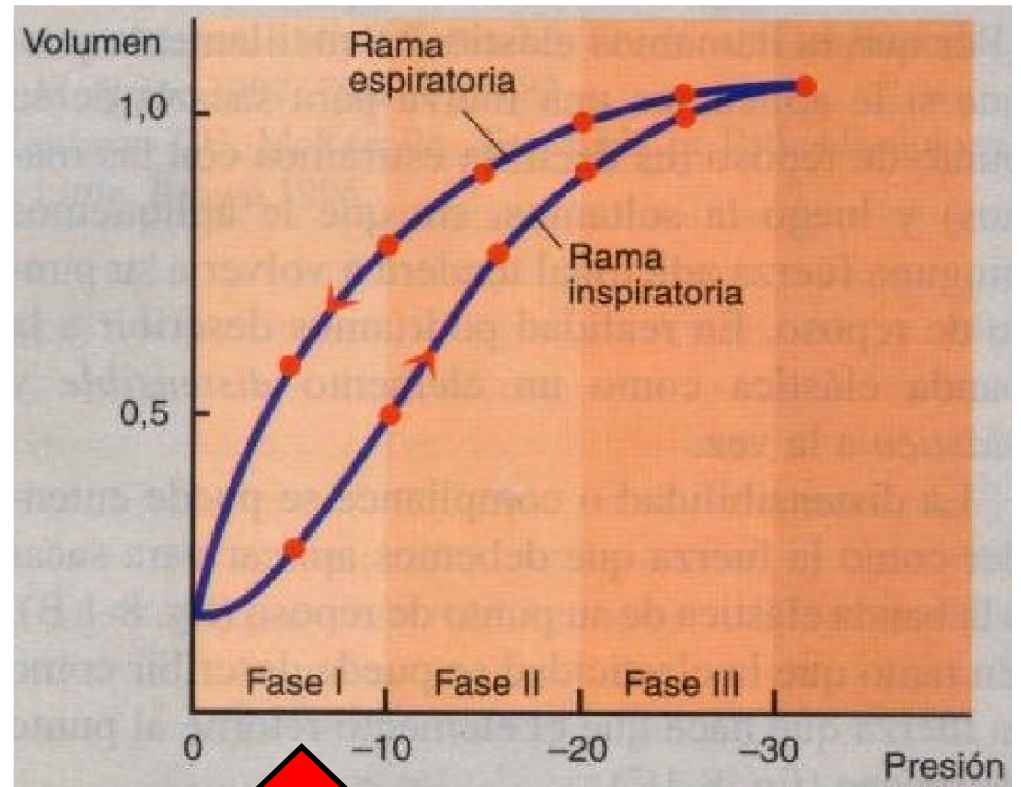


Si faltase el surfactante, por ejemplo en la **enfermedad de membrana hialina**, del recién nacido, puede sobrevenir la muerte en 48 a 72 horas.



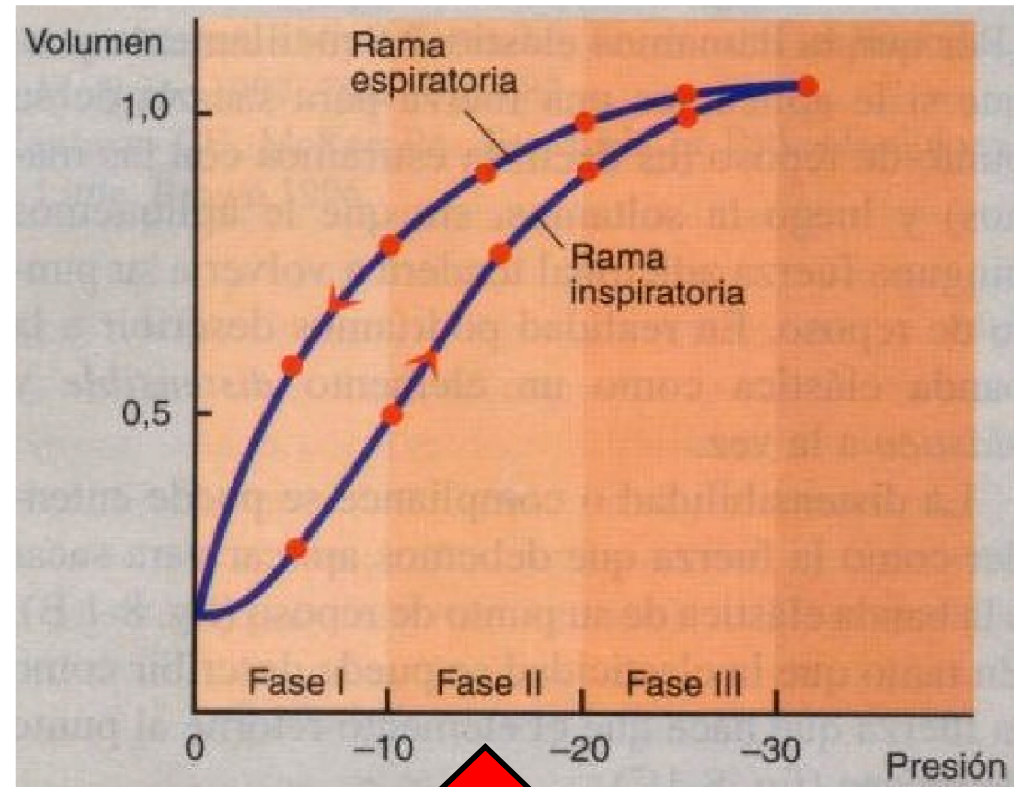
## Descripción de la rama inspiratoria

**Fase I:** Inicio de la inspiración. Aquí hay que generar un gradiente de presión importante en relación con el poco volumen inspirado.



## Descripción de la rama inspiratoria

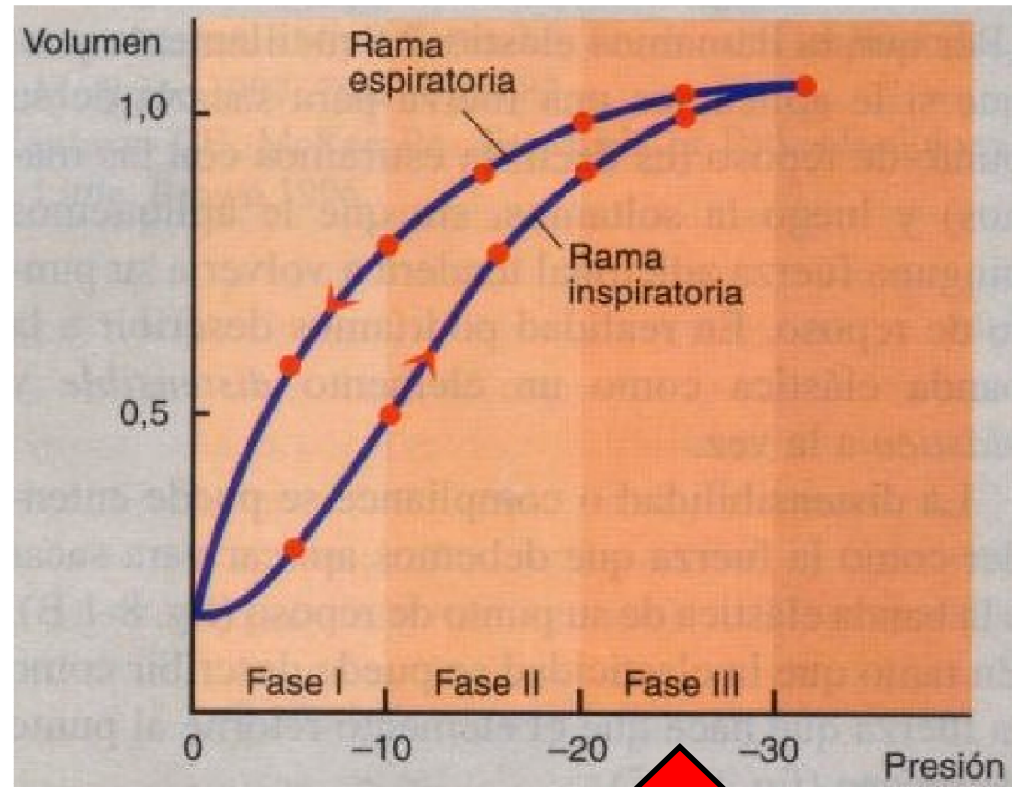
**Fase II:** Casi toda la inspiración. Con escaso gradiente de presión se moviliza un volumen importante de aire inspirado. Esa Fase se define como la curva “ideal” de compliance dado que con sólo un pequeño esfuerzo se inspira gran cantidad de aire.





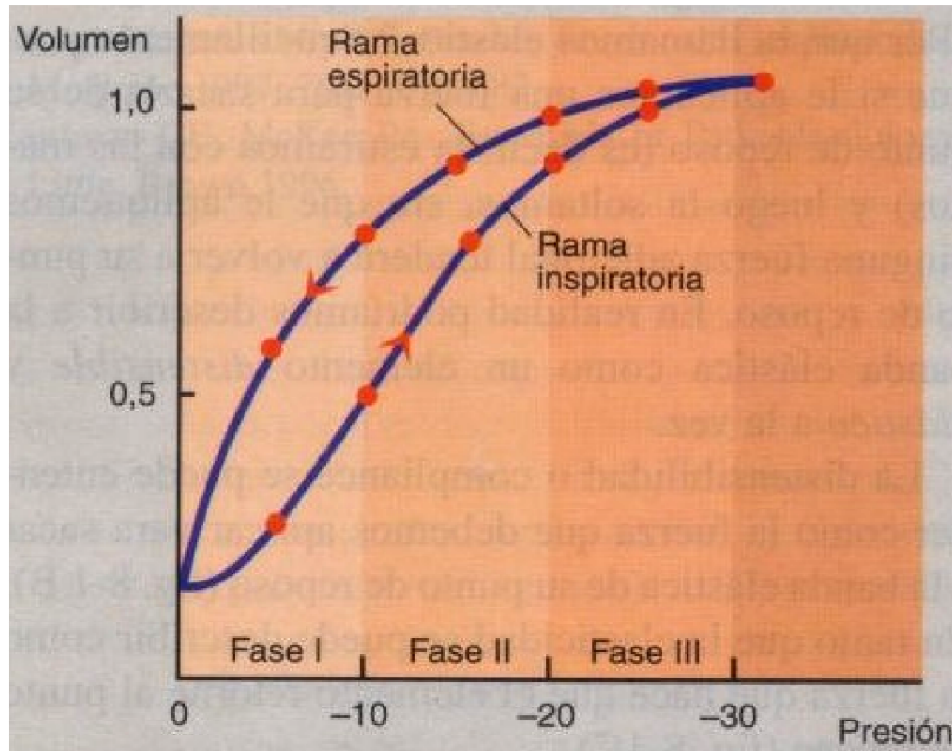
## Descripción de la rama inspiratoria

**Fase III:** A medida que se incrementa el volumen pulmonar hay que generar mayor gradiente de presión para ingresar un volumen de aire. En una inspiración normal esta fase corresponde al final.





## Histéresis pulmonar



Un fenómeno interesante es que la **relación** entre el **cambio de volumen** por **cambio de presión** **es diferente** en la inspiración y en la espiración.

Para el mismo gradiente de presión se logra movilizar más volumen en la espiración que en la inspiración.

La diferencia de la curva de compliance para la inspiración respecto de la espiración se denomina **histéresis pulmonar** y se debe, sobre todo a la presencia del surfactante.

Según el Diccionario de la Real Academia Española

**histéresis.** (Del gr. ὑστέρησις, retraso).

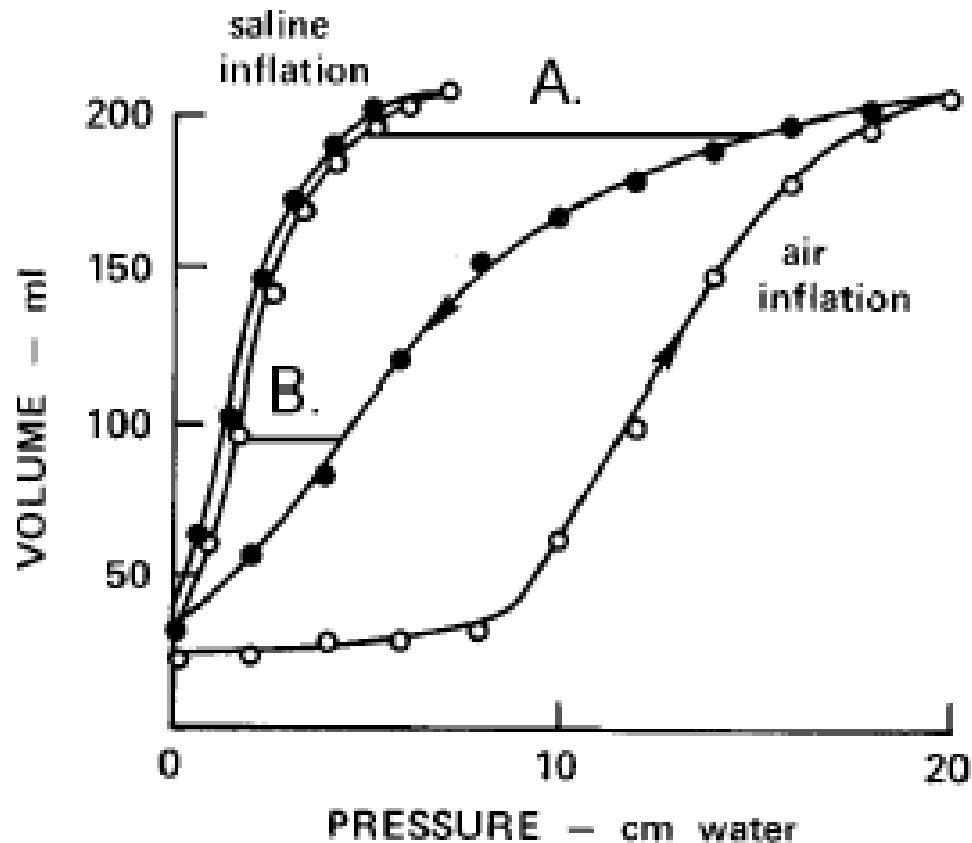
1. f. *Biol.* y *Fís.* Fenómeno por el que el estado de un material depende de su historia previa.

Esa diferencia que se registra se debe en gran parte a la **tensión superficial** de la interfase aire-agua que está en el alveolo, que se suma a la de las **fibras elásticas** del pulmón. Ambas se oponen a la insuflación pulmonar y se llaman en conjunto **Fuerza Elástica Pulmonar**. (FEP)

Cuando uno **espira**, la **fuerza elástica pulmonar** y por lo tanto la tensión superficial **favorecen la salida del aire**. Eso explica que se necesiten variaciones de presión pequeñas para desinsuflar el pulmón, y muy grandes variaciones de presión para insuflarlo.

La histéresis ocurre en presencia de surfactante.

Cuando insuflamos con liquido el pulmón, evitamos ese problema, ya que no tenemos que vencer ninguna tensión superficial, entonces la histéresis se reduce casi a 0.

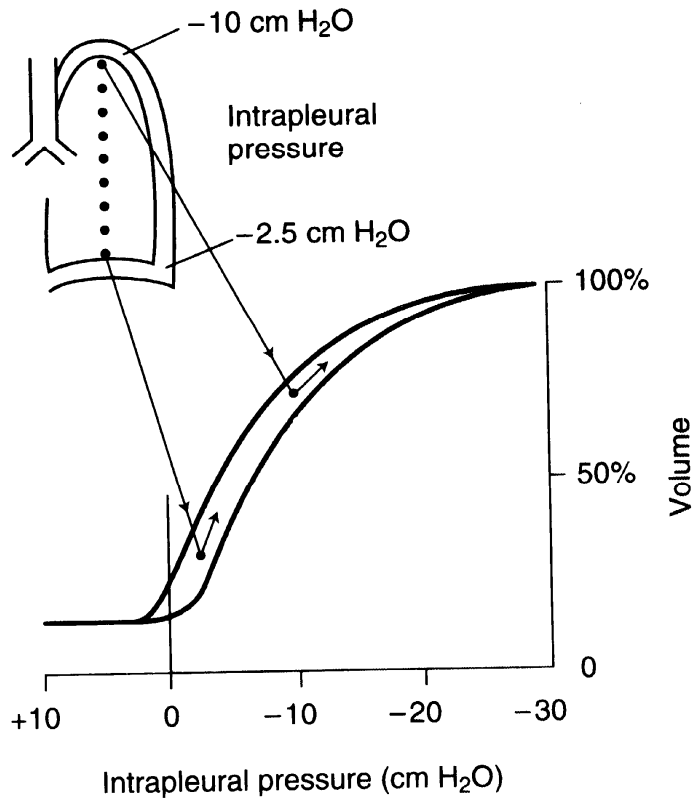


### **3- Distensibilidad del tórax**

Cuando se realiza la inspiración los músculos deben vencer no sólo la oposición elástica del pulmón, sino también la de las paredes elásticas.

En realidad, al comienzo de la inspiración (alrededor de los primeros 600 ml) las paredes de tórax ayudan a los músculos inspiratorios porque está alejado de su posición de reposo.

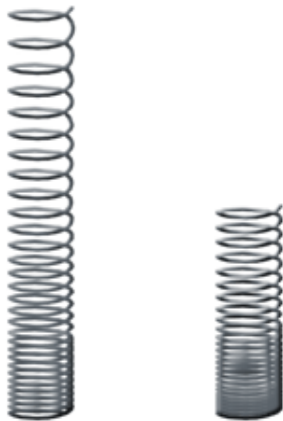
## 4- Distribución de aire en los pulmones



La distribución del aire **no es homogénea**.

En la posición de pie, la **ventilación de las bases pulmonares es mayor que la de los vértices**. Debido a la acción de la gravedad sobre el pulmón y el líquido intrapleurales, la presión intrapleurales es más negativa en el vértice y se hace menos negativa a medida que nos acercamos a las bases.

Por ello, los **alvéolos del ápice** estarán más distendidos que los basales y se hará más difícil distenderlos aún más y por lo cual **ventilan menos que los de la base**.



## Resistencias de las vías aéreas

Durante la respiración tranquila el flujo de aire es laminar



Al ponerse en movimiento una masa gaseosa, las moléculas más periféricas colisionan con las paredes del conducto, perdiendo velocidad y luego, al desplazarse hacia el centro de la corriente y colisionar con las otras moléculas, “transmite” la oposición al flujo gaseoso. De esta manera la velocidad es máxima en el centro y mínima en la periferia.

La resistencia guarda con el flujo de aire y con la presión que la origina, una relación similar a la establecida por la **ley de Ohm** para la electricidad

$$I = V/R$$

Para los gases

$$V = \Delta P / R$$

donde

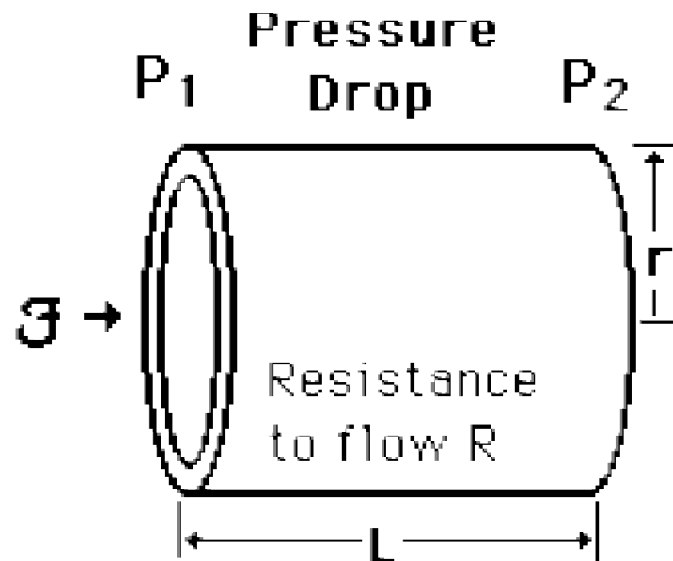
**V** = flujo de aire,

**$\Delta P$**  = diferencia de presiones entre los extremos del tubo

**R** = resistencia al flujo de aire



De acuerdo a la **ley de Poiseuille**:



$$\text{Volume Flowrate} = Q = \frac{P_1 - P_2}{R} = \frac{\pi(\text{Pressure difference})(\text{radius})^4}{8(\text{viscosity})(\text{length})}$$

Por lo tanto la resistencia (R) será:

$$R = 8 L \eta / \pi r^4$$

donde

**L** es la longitud del tubo

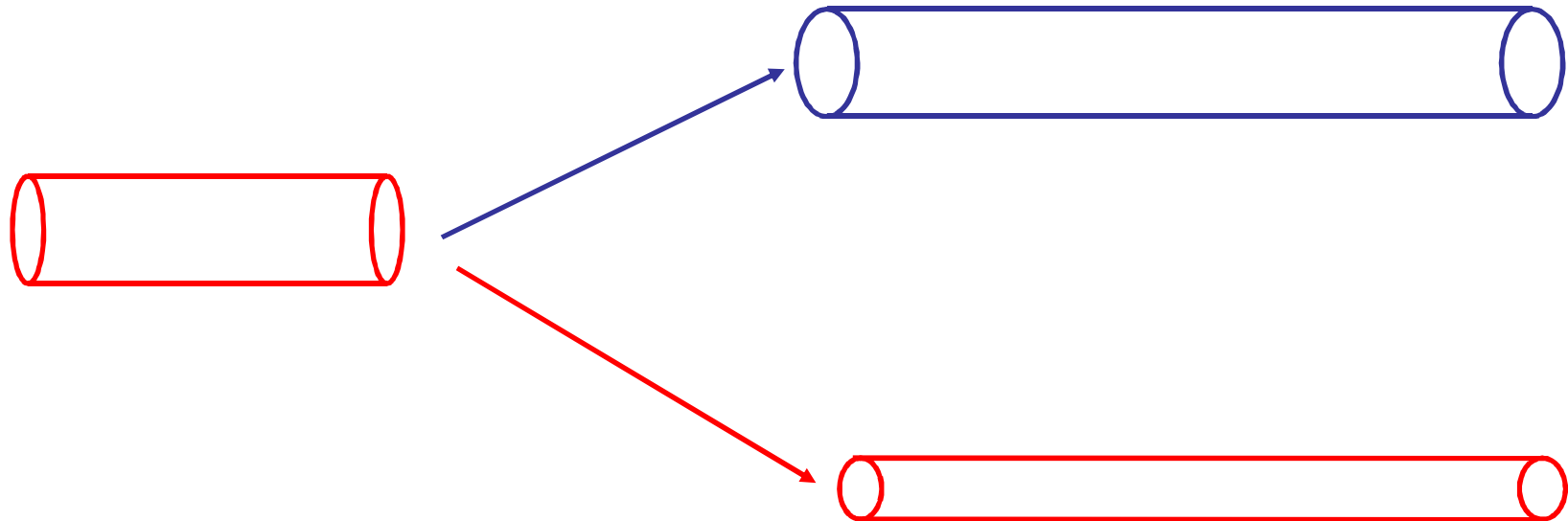
**$\eta$**  es la viscosidad y

**r** es el radio del tubo.

Lo destacable es la gran dependencia de la resistencia con el valor del radio, el que al estar elevado a la cuarta potencia determina que al producirse pequeños cambios en su magnitud, se ocasionan enormes variaciones de la resistencia.

Esta ecuación se cumple **siempre que el flujo sea laminar**

$$R = 8 L \eta / \pi r^4$$



Si el radio disminuye a la mitad  
La resistencia aumenta 16 veces (!)

Cuando se sobrepasa un valor crítico (número crítico de Reynolds).el flujo se hace turbulento

$$R \text{ (numero de Reinolds)} = 2 r v \delta / \eta$$

Cuando aparece una turbulencia, la resistencia deja de ser una constante para convertirse en un valor variable que se calcula como:

$$R_{\text{(variable)}} = f \frac{1}{4} \pi r^4$$

**f** involucra a Reynolds y a la rugosidad de la pared

Por lo tanto:

$$V = \Delta P / R_{\text{(variable)}}$$

Conviene agregar que cuando varios tubos están conectados en serie, las resistencias de los mismos se suman,

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + \text{etc.}$$

y cuando están conectados en paralelo, la inversa de la resistencia total es igual a las sumas de las inversas de cada resistencia,

$$1/R_{\text{total}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \text{etc.}$$

por lo tanto disminuye.

Ya pueden  
tomarse un  
respiro :-)

