

► Circulación Pulmonar

Observatory Teaching learning of Physiology

Autores	Fernando Aryan Díaz Velarde
Afiliación	Departamento de Fisiología, Facultad de Medicina, UNAM
Información del Trabajo	
Recibido	15 de noviembre de 2019
Revisado	01 de diciembre de 2019
Aceptado:	04 de diciembre de 2019
Palabras clave	Circulación, zonas de ventilación, perfusión, volumen pulmonar

Resumen

En este resumen se abordan la anatomía funcional de los pulmones, la circulación bronquial y pulmonar, además de abordar las características hemodinámicas del sistema respiratorio, en donde se mencionan las presiones de dicho sistema, la resistencia vascular, el gasto cardíaco y el proceso de reclutamiento alveolar.

El pulmón recibe flujo sanguíneo a través dos arterias, la bronquial y la pulmonar, estudiaremos cada una de ellas a las que denominaremos circulación bronquial y la circulación pulmonar.

Circulación Bronquial

- Frederick Ruysch observó por primera vez su existencia en la segunda mitad del siglo XVII.
- Sistema de bajo flujo y alta presión.
- Constituye aproximadamente el 1-2% del gasto cardiaco del ventrículo izquierdo.
 - En ciertas enfermedades inflamatorias de las vías respiratorias (p. ej., bronquitis crónica), puede ser tan alto como el 10% del gasto cardiaco.
- Es la única porción de la circulación en el pulmón adulto capaz de presentar angiogenia.
- Procede de las arterias bronquiales, que son ramas de la aorta torácica.
- Proporcionan flujo sanguíneo a la tráquea, el árbol bronquial hasta el nivel de los bronquiólos terminales, tejidos de sostén y la superficie pleural visceral.
- Aunque parte de la sangre venosa ingresa a las venas ácigos y hemiácigos, una parte sustancial de la sangre venosa ingresa a las venas pulmonares para llegar finalmente a la aurícula izquierda.
 - Tradicionalmente se considera que el gasto cardíaco del ventrículo derecho es igual al gasto cardíaco del ventrículo izquierdo, sin embargo, hay una pequeña diferencia debido a este retorno venoso y a una pequeña cantidad de sangre venosa coronaria que drena directamente al ventrículo izquierdo a través de la vena de Tebesio.
 - Esta sangre desoxigenada, que se mezcla con sangre enriquecida con oxígeno en las venas pulmonares, contribuye a la pequeña diferencia alvéolar-arterial de oxígeno en individuos normales.

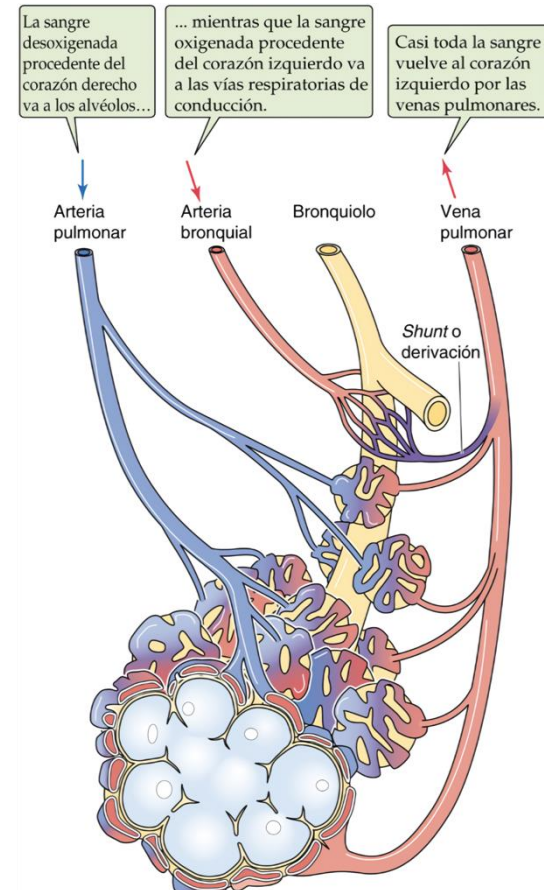


Imagen SEQ Imagen * ARABIC 1.

Circulación Pulmonar

- Es un sistema de alto flujo y baja presión. Necesita ser un sistema de baja presión porque necesita bombear sangre solo hasta la parte superior del pulmón, además de evitar las consecuencias de las fuerzas de Starling, que de no ser así habría edema pulmonar.
- La arteria pulmonar recibe la sangre del ventrículo derecho y sus ramas arteriales la transportan a los capilares alveolares para el intercambio gaseoso para después pasar a las venas pulmonares y finalmente devolver la sangre a la aurícula izquierda.
 - Una única arteriola pulmonar vasculariza todos los capilares de una unidad respiratoria terminal.
 - En reposo los eritrocitos pasan ~0,75 segundos navegando por este lecho capilar.
- El tiempo circulatorio total por la circulación pulmonar es de 4 a 5 segundos.

Volumen Sanguíneo

- Es de aproximadamente 450-500 mL □ Equivalente del 9-10% del volumen de sangre total en el cuerpo.

- Representa más del 40% del peso del pulmón.
- Las venas pulmonares contienen más sangre (~270 mL) que las arterias pulmonares (~150 mL).
- Aproximadamente 70-80 mL de este volumen está en los capilares pulmonares.
 - Durante el ejercicio, el volumen de la sangre capilar puede aumentar hasta ~200 mL.
- En varias situaciones fisiológicas y patológicas la cantidad de sangre de los pulmones puede variar desde la mitad del valor normal hasta el doble de lo normal.

Propiedades de los Vasos Sanguíneos

- Son más cortos y anchos que los equivalentes de la circulación sistémica y tiene un mayor número de arteriolas que en la circulación sistémica.
 - Estas propiedades se combinan para producir un sistema con una resistencia anormalmente baja.
- Sus paredes son mucho más delgadas que las partes correspondientes de la circulación sistémica.
 - La delgadez de las paredes y la escasez de músculo liso dan a los vasos una distensibilidad elevada.
 - Son especialmente susceptibles a la deformación por fuerzas externas.
 - Permite aceptar cantidades relativamente grandes de sangre que se desplazan desde las piernas hasta los pulmones cuando una persona pasa de estar de pie a estar acostada.
 - Permite que los vasos se dilaten en respuesta a pequeños aumentos de la presión arterial pulmonar.
 - La presión del pulso en el sistema pulmonar es bastante baja (en una escala absoluta). Sin embargo, en relación con la presión arterial pulmonar media (15 mmHg), la presión de pulso pulmonar (17 mmHg) es bastante elevada.

Funciones Secundarias

- Los vasos pulmonares protegen al cuerpo contra los trombos (coágulos de sangre) y émbolos (glóbulos de grasa o burbujas de aire), impidiendo que entren a vasos importantes en otros órganos.
 - Las células endoteliales que revisten a los vasos pulmonares liberan sustancias fibrinolíticas que ayudan a disolver trombos pequeños.
 - Los émbolos de aire se absorben a través de las paredes de los capilares pulmonares.
- En la circulación pulmonar se metabolizan hormonas vasoactivas.
 - La angiotensina I (AngI) es activada y convertida a angiotensina II (AngII) en los pulmones por la enzima convertidora de angiotensina (ECA) localizada en la superficie de las células endoteliales capilares.
 - El 80% de la AngI puede ser convertida a AngII durante un solo paso a través de la circulación pulmonar.
 - Las células endoteliales pulmonares inactivan a la bradicinina, serotonina y a las prostaglandinas E_1 , E_2 y $F_{2\alpha}$.
- Los pulmones actúan como reservorio de sangre.
- Regulan el pH sanguíneo.
- Fragmentan a los megacariocitos para la formación de plaquetas.

Presiones en el Sistema Pulmonar

Ventrículo Derecho

- Presiones sistólica/diastólica → 25/0-1 mmHg.
- Gasto cardiaco (\dot{Q}) → 5 L/min o 83 mL/s.

Arteria Pulmonar

- Presiones sistólica/diastólica → 25/8 mmHg.
- Presión de pulso → ~17 mmHg.
- Presión arterial media → ~15 mmHg.

Capilares Pulmonares

- Presión media → ~7 mmHg.

Atrio Izquierdo

- Presión media → ~8 mmHg (Boron y Boulpaep, 2017) (Berne y Levy, 2018).
~5 mmHg (Rhoades y Bell, 2018) (Raff y Levitzky, 2011).
~1-5 mmHg (Hall, 2016).
- Habitualmente no es posible medir la presión auricular izquierda utilizando un dispositivo de medida directa, sin embargo, con frecuencia se puede estimar con una exactitud moderada midiendo la **presión de enclavamiento pulmonar**.
 - Se consigue introduciendo un catéter a través de una vena periférica de grueso calibre hasta la aurícula derecha, pasando al ventrículo derecho, llegando a través de la arteria pulmonar hacia una de las pequeñas ramas de la arteria pulmonar y finalmente empujando el catéter hasta que se enclava firmemente en la rama pequeña.
 - Esta presión de enclavamiento es habitualmente solo de 2 a 3 mmHg.

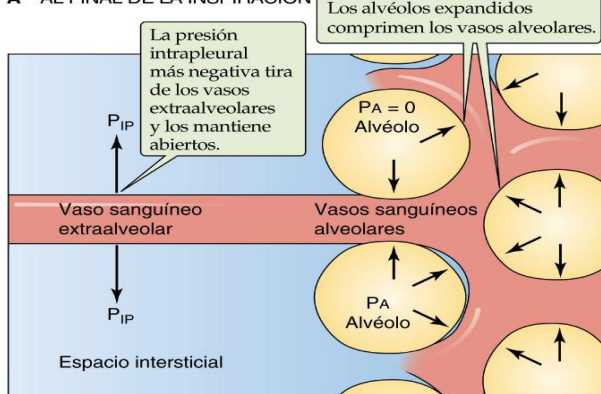
Circulación Pulmonar

- Resistencia total □ 0.08 URP o 0.08 mmHg/(mL/s).
 - Es menor de la décima parte de la circulación sistémica.

Resistencia Vascular Pulmonar

Volúmenes Pulmonares

A AL FINAL DE LA INSPIRACIÓN



B DEPENDENCIA DE LA RESISTENCIA VASCULAR RESPECTO DEL VOLUMEN PULMONAR

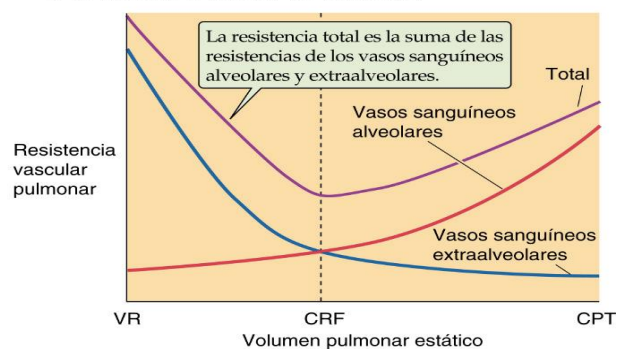


Imagen 3. Resistencia vascular pulmonar.

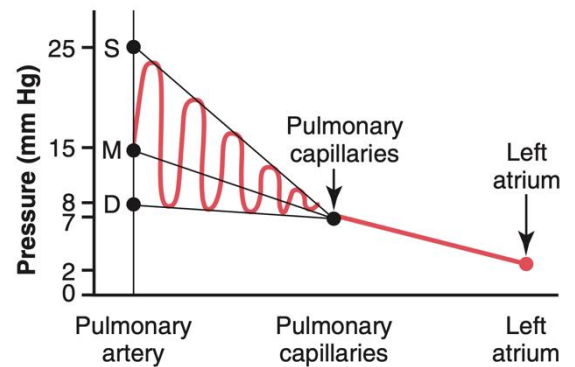


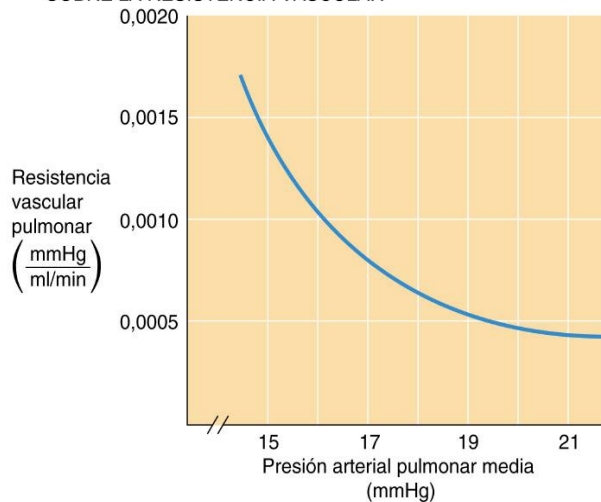
Imagen 2. Presiones en los diferentes vasos de los pulmones. La curva roja denota pulsaciones arteriales.

- Como los vasos sanguíneos pulmonares son tan distensibles, son especialmente susceptibles a la deformación por fuerzas externas □ Cambios del volumen pulmonar (V_P).
- Para mantener la sencillez, aquí asumimos que, siempre que examinamos un nuevo V_P y el flujo aéreo se ha detenido de manera que la P_A es cero.
 - Vasos alveolares (arteriolas, capilares y vénulas).
 - Están sujetos principalmente a la presión alveolar.
 - A medida que aumenta el V_P , también se incrementa la resistencia de los vasos alveolares.
 - Vasos extraalveolares (arterias y venas pulmonares).
 - Están sujetos a la principalmente presión pleural.
 - A medida que aumenta el V_P , la presión pleural es más negativa, ocasionando el aumento de la presión transmural que provoca su distensión □ Se disminuye su resistencia.
- Debido a que los vasos alveolares y extraalveolares pueden verse como dos grupos de vasos de resistencia conectados en serie, las resistencias se suman a cualquier volumen pulmonar.
 - La resistencia vascular pulmonar es más baja en la capacidad residual funcional (CRF) y aumenta tanto con los volúmenes pulmonares altos como bajos.

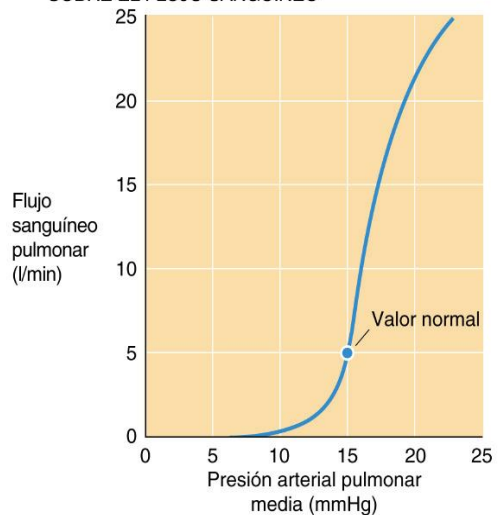
Gasto Cardíaco

- Durante el ejercicio, existen aumento del gasto cardíaco de 2-3 veces que produce un aumento pequeño de la presión arterial pulmonar media.
- Aquí actúan dos **mecanismos pasivos** (mecanismos que no se relacionan con cambios activos del tono del músculo liso vascular): distensión de los capilares pulmonares.
 - Reclutamiento Capilar
 - En condiciones normales, algunos capilares se cierran parcial o completamente, en particular en la parte superior de los pulmones, debido a la baja presión/perfusión.
 - A medida que el flujo sanguíneo aumenta, la presión se eleva, y los vasos cerrados se abren, reduciendo la resistencia general.
 - Principal mecanismo para la caída en la presión vascular pulmonar cuando el gasto cardíaco aumenta.
 - Distensión de los Capilares
 - Una vez que un vaso sanguíneo está abierto y conduce sangre, se provoca un aumento adicional de la presión hará que aumente la P_{TM} y de esta forma el vaso se dilará.
 - Aunque el aumento de presión puede producir simultáneamente reclutamiento y distensión de diversos vasos, la distensión probablemente tienda a producirse después.

A EFECTO DE LA PRESIÓN ARTERIAL PULMONAR SOBRE LA RESISTENCIA VASCULAR



B EFECTO DE LA PRESIÓN ARTERIAL PULMONAR SOBRE EL FLUJO SANGUÍNEO



C RECLUTAMIENTO Y DISTENSIÓN DE VASOS ALVEOLARES

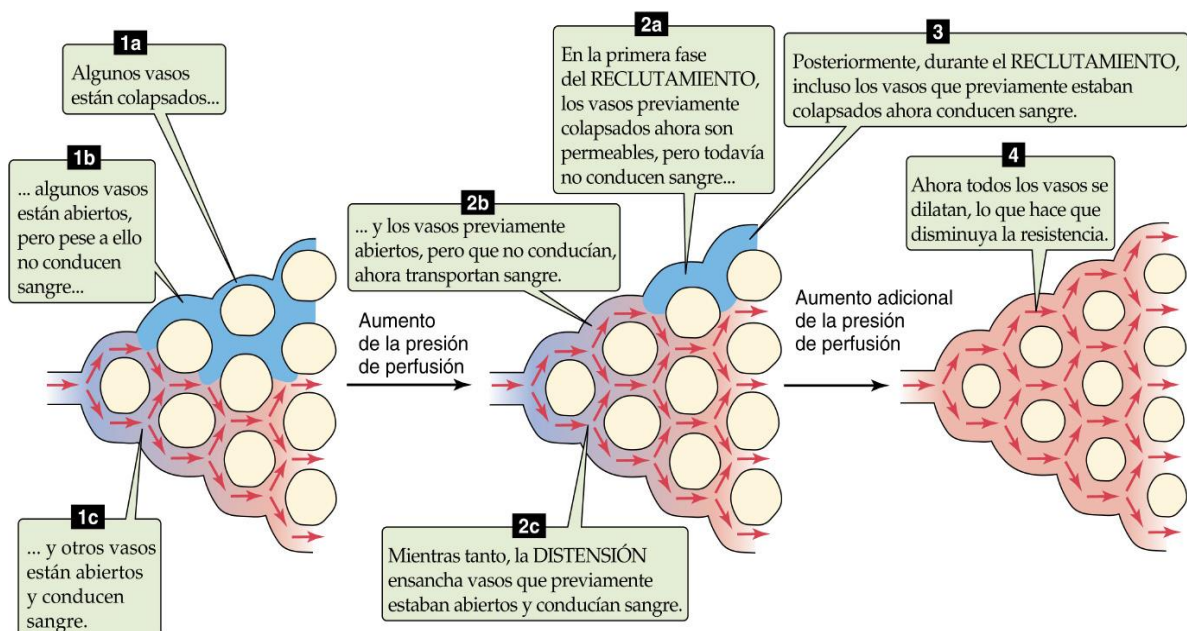


Imagen 4. Efectos de la presión de perfusión sobre la hemodinámica pulmonar.

Control del Músculo Liso Vascular Pulmonar

- El principal factor que regula el flujo sanguíneo pulmonar es la presión parcial de O_2 en el gas alveolar, PAO_2 .
 - La disminución de la PAO_2 produce vasoconstricción pulmonar, es decir, vasoconstricción hipóxica y es acentuada por la $PACO_2$ y el pH bajo en la sangre.
 - Ocurre especialmente cuando disminuye por debajo del 70% de lo normal $\square <73$ mmHg de PAO_2 .
 - Se produce en tejido pulmonar aislado y, por lo tanto, no depende ni del sistema nervioso ni de hormonas sistémicas.
 - Se desconoce cómo se produce, aunque los mecanismos propuestos establecen que la hipoxia inhibe uno o más canales de K^+ , produciendo la despolarización de membrana del músculo liso y activando canales de Ca^{2+} dependientes de voltaje. La entrada de iones de calcio provoca así la contracción muscular.

- Su función es la adecuada distribución del flujo sanguíneo hacia regiones bien ventiladas del pulmón.
- La inervación autonómica de la vasculatura pulmonar es mucho menos abundante que la de la circulación sistémica. Parece no haber inervación de vasos menores de 30 μm de diámetro.
 - Tono Simpático
 - Reduce la distensibilidad de las paredes de las arterias pulmonares sin aumentar la resistencia en sí misma.
 - Tono Parasimpático
 - Produce una vasodilatación ligera.

Distribución del Flujo Sanguíneo en los Pulmones

- El efecto de la gravedad sobre el flujo sanguíneo pulmonar es dramático, y resulta en una distribución desigual del flujo en los pulmones.
 - La diferencia en la presión arterial entre el ápex y la base es de aproximadamente 30 cmH_2O .
- Tradicionalmente se puede dividir el pulmón vertical en tres zonas según las relaciones entre las diversas presiones. Sin embargo, la zona 3 la podemos subdividir en dos zonas, dando un total de cuatro zonas pulmonares.
 - Estas zonas son fisiológicas, no anatómicas \square Los límites entre las zonas no están fijos ni son nítidos.
 - Los límites pueden descender en la ventilación a presión positiva (que aumenta la P_A).
 - Asimismo, pueden ascender con el ejercicio (que aumenta la P_{AP}).
 - En el análisis de las zonas pulmonares se asume de forma tácita que la P_A siempre es cero y que los valores de la P_{AP} y la P_{VP} se mantienen estables y dependen únicamente de la altura en el pulmón.
 - Al nivel de la aurícula izquierda (punto de referencia para las mediciones de la presión), la P_{AP} media es $\sim 15 \text{ mmHg}$ o $\sim 20 \text{ cmH}_2\text{O}$. De manera similar, la P_{VP} media es $\sim 8 \text{ mmHg}$ o $\sim 10 \text{ cmH}_2\text{O}$.
 - A medida que ascendemos las presiones reales en la luz de las arteriolas y las vénulas pulmonares disminuyen 1 cmH_2O o 0.74 mmHg por cada 1 cm de ascenso vertical.
 - Al mismo tiempo, las presiones hidrostáticas en la arteriola, el capilar y la vénula aumentan en paralelo 1 cmH_2O o 0.74 mmHg por cada 1 cm de descenso vertical.

Zona 1: $P_A > P_{AP} > P_{VP}$

- Los capilares colapsan por el mayor valor de la P_A externa, y se interrumpe el flujo sanguíneo.
- En condiciones normales esta zona no existe, sin embargo, pueden producirse si:
 - Hay una disminución suficiente de la P_{AP} \square Hemorragia.
 - Hay un aumento suficiente de la P_A \square Ventilación a presión positiva.

Zona 2: $P_{AP} > P_A > P_{VP}$

- La P_{AP} y la P_{VP} medias son suficientemente elevadas, de manera que la P_A se encuentra entre ellas.
- Como P_A vale más que P_{VP} , la mayor P_A externa colapsa de forma parcial los capilares.

Zona 3: $P_{AP} > P_{VP} > P_A$

- La P_{AP} y la P_{VP} medias son tan elevadas que ambas son mayores que la P_A .
- La P_{TM} es positiva en toda la longitud del vaso alveolar y tiende a dilatarlo.

Zona 4: $P_{AP} > P_{VP} > P_A$

- Los vasos alveolares se comportan como en la zona 3.
- En los vasos extraalveolares las fuerzas de distensión que actúan sobre los vasos sanguíneos se desvanecen y aumenta la resistencia de estos vasos.
 - Esto debido a que en la base del pulmón es donde alcanza la P_{IP} su valor menos negativo.
- Durante el ciclo cardíaco, la presión dentro de las arteriolas y los capilares pulmonares es máxima durante la sístole (favorece la dilatación del vaso) y mínima durante la diástole.
- Por tanto, se esperaría que el flujo sanguíneo a través de un vaso alveolar fuera máximo cuando la inspiración coincide con la sístole.

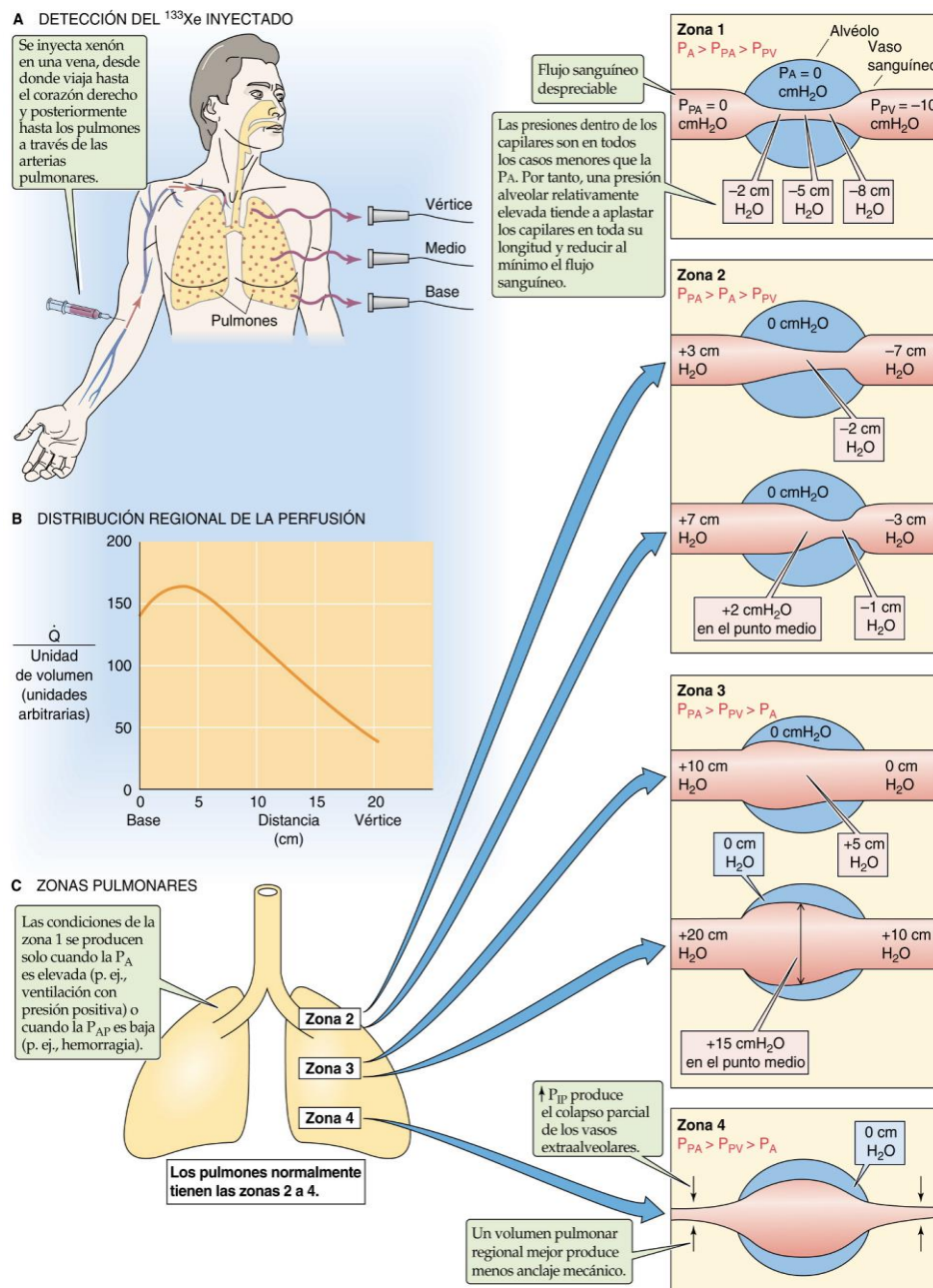


Imagen 5. Falta de uniformidad fisiológica de la perfusión pulmonar.

Bibliografía:

1. Boron WF, Boulpaep EL. *Fisiología Médica*. 3ª edición. España: Elsevier, 2017.
2. Cloutier, MM. *Respiratory Physiology*. 2nd edition. United States: Elsevier, 2019.
3. Derrickson B. *Fisiología Humana*. 1ª edición. México: Editorial Médica Panamericana, 2019.
4. Fox SI. *Fisiología Humana*. 14ª edición. México: McGraw Hill, 2017.
5. Hall JE. *Guyton y Hall. Tratado de Fisiología Médica*. 13ª edición. España: Elsevier, 2016.
6. Koeppen BM, Stanton BA. *Berne y Levy. Fisiología*. 7ª edición. España: Elsevier, 2018.
7. Raff H, Levitzky M. *Medical Physiology*. 1st edition. United States: McGraw Hill, 2011.
8. Rhoades RA, Bell DR. *Fisiología Médica*. 5ª edición. México: Wolters Kluwer, 2019.