



Exploración Ecográfica de la Fisiología Respiratoria: Pulmones, Diafragma e Interacción Cardio-Pulmonar

Rubén Dario Mesa Carvajalino

Objetivos

Introducción

Anatomía Funcional y su Correlación Ecográfica: eje Pulmón-Riñón

Física de la Ecografía y Términos Relevantes

Evaluación Ecográfica del Sistema Respiratorio

Evaluación Ecográfica de la Interacción Cardio-Pulmonar

Fisiología Respiratoria y Ventilación Mecánica

Conclusión

Bibliografía

Tabla de Contenido

1. Introducción
 - 1.1 Importancia de la ecografía en la evaluación de la fisiología respiratoria
 - 1.2 Integración de la ecografía en el aprendizaje de la fisiología respiratoria
 - 1.3 Alcance del capítulo
2. Anatomía funcional y su correlación ecográfica
 - 2.1 Bases fisiológicas de la ventilación y la perfusión pulmonar (West)
 - 2.2 Correlación con la ecografía pulmonar (Lichtenstein)
 - 2.3 Aplicaciones clínicas de la ecografía en la evaluación de la fisiología respiratoria
3. Física del ultrasonido y términos relevantes
 - 3.1 Principios físicos del ultrasonido
 - 3.2 Modos de ultrasonido
 - 3.2.1 Modo 2D
 - 3.2.2 Modo M
 - 3.2.3 Doppler color
 - 3.2.4 Doppler tisular
 - 3.3 Tipos de transductores
 - 3.3.1 Transductor lineal
 - 3.3.2 Transductor convexo
 - 3.3.3 Transductor microconvexo
 - 3.4 Artefactos ecográficos en la evaluación pulmonar
 - 3.5 Definición de términos clave en ecografía pulmonar
4. Evaluación ecográfica del sistema respiratorio
 - 4.1 Evaluación del deslizamiento pleural
 - 4.1.1 Ubicación del transductor y técnica correcta
 - 4.1.2 Estructuras esperadas
 - 4.2 Evaluación de la base pulmonar y derrames pleurales
 - 4.2.1 Ubicación y maniobras del transductor
 - 4.2.2 Identificación del punto PLAPS
 - 4.3 Evaluación de neumotórax
 - 4.3.1 Fisiología del neumotórax
 - 4.3.2 Identificación ecográfica: ausencia de deslizamiento pleural y lung point
 - 4.4 Evaluación del edema pulmonar
 - 4.4.1 Fisiología del edema pulmonar
 - 4.4.2 Apariencia ecográfica: líneas B
 - 4.5 Evaluación del derrame pleural
 - 4.5.1 Fisiología y causas del derrame pleural
 - 4.5.2 Características ecográficas del líquido pleural (seroso, hemático, purulento)
 - 4.6 Evaluación de las consolidaciones pulmonares
 - 4.6.1 Fisiopatología de la neumonía y atelectasia
 - 4.6.2 Diferenciación ecográfica entre neumonía y atelectasia
 - 4.6.3 Uso del Doppler color para distinguir consolidaciones

5. Evaluación ecográfica de la interacción cardiopulmonar

5.1 Importancia de la interacción cardiopulmonar

5.2 Técnica ecográfica

5.2.1 Transductor recomendado

5.2.2 Ventanas ecocardiográficas y sus vistas

Ventana subcostal

Ventana paraesternal

Ventana apical

Ventana suprasternal

5.3 Evaluación ecográfica de la VCI como marcador de precarga

5.4 Evaluación de la función ventricular izquierda

5.4.1 Técnicas ecográficas para evaluar la función ventricular

5.4.2 Disfunción ventricular izquierda y sus hallazgos pulmonares

5.4.3 Relación del índice E/e' con la presión de oclusión de la arteria pulmonar (POAP)

5.5 Evaluación de la relación ventilación-perfusión (V/Q)

5.6 Evaluación de la hipoxemia y sus tipos

6. Fisiología respiratoria y ventilación mecánica: una visión ecográfica

6.1 Introducción: Cambios fisiológicos en la ventilación mecánica

6.2 Utilización de la ecografía en la monitorización de la ventilación mecánica

6.2.1 Importancia de la evaluación ecográfica en tiempo real

6.2.2 Identificación precoz de complicaciones ventilatorias

6.2.3 Optimización del soporte ventilatorio y titulación de PEEP

6.3 Evaluación de la función diafragmática en pacientes ventilados

6.3.1 Fisiología del diafragma en ventilación mecánica

6.3.2 Disfunción diafragmática inducida por ventilación mecánica (VIDD)

6.3.3 Monitorización ecográfica del diafragma (excursión y fracción de engrosamiento)

6.3.4 Uso de la ecografía en el destete ventilatorio

6.4 Ecografía en la valoración de la aireación pulmonar en el SDRA

6.4.1 Zonas de West y su implicación fisiológica

6.4.2 Protocolo Lung Ultrasound Score (LUSS): Evaluación de la aireación

6.5 Monitorización de la interacción cardiopulmonar en ventilación mecánica

6.5.1 Efectos de la presión positiva en la mecánica cardiopulmonar

6.5.2 Evaluación ecográfica de la titulación de PEEP

6.5.3 Uso de la onda S sistólica, TAPSE y MAPSE para evaluar función ventricular

7. Conclusión

7.1 La ecografía como herramienta clave en la fisiología respiratoria

7.2 Aplicación en la enseñanza médica y la práctica clínica

7.3 Necesidad de investigación y desarrollo de guías estandarizadas

8. Bibliografía

Introducción

La ecografía se ha convertido en una herramienta clave en la evaluación del cuerpo humano, permitiendo un análisis no invasivo, preciso y en tiempo real de diversas estructuras y funciones. Este capítulo está dirigido a todo el personal de salud, desde estudiantes, médicos, hasta especialistas, terapeutas respiratorios y personas interesadas en la fisiología respiratoria, con el objetivo de brindar una visión integral sobre el uso de la ecografía en pacientes ventilados y no ventilados en diversos contextos clínicos.

Desde nuestros primeros años en la carrera de medicina, el aprendizaje de conceptos de fisiología puede resultar desafiante al depender exclusivamente de libros y esquemas teóricos. Sin embargo, la ecografía permite observar en tiempo real muchos de los procesos fisiológicos involucrados en la ventilación y la interacción cardiopulmonar, facilitando una comprensión más rápida y profunda de estos mecanismos. Esta herramienta no solo mejora el entendimiento de la fisiología, sino que también clarifica la posterior interpretación de patologías relacionadas con el sistema respiratorio y cardiovascular.

Además, conceptos avanzados como la relación ventilación-perfusión (V/Q), la respuesta a variaciones en la presión intratorácica y los efectos del esfuerzo y el estrés pueden ser mejor comprendidos y aplicados clínicamente al integrar el conocimiento fisiológico con hallazgos ecográficos en tiempo real.

La ecografía se ha convertido en una herramienta innovadora para el estudio y la monitorización de la fisiología respiratoria, permitiendo visualizar en tiempo real los procesos que ocurren en los pulmones, el diafragma y su interacción con el sistema cardiovascular. Tradicionalmente, el aprendizaje de la fisiología pulmonar se ha basado en modelos teóricos; sin embargo, la ecografía ofrece una aproximación práctica y dinámica que facilita su comprensión y aplicación clínica.

Este capítulo aborda los fundamentos de la anatomía funcional y la correlación ecográfica, integrando los principios clásicos de West sobre la ventilación y perfusión pulmonar con los aportes de Lichtenstein en ecografía pulmonar. Se explican los conceptos físicos del ultrasonido, los tipos de transductores y los artefactos que permiten interpretar adecuadamente los hallazgos ecográficos.

Se detallan las técnicas de evaluación ecográfica del sistema respiratorio, incluyendo la exploración de la línea pleural, el diagnóstico de neumotórax, la detección de edema pulmonar a través de las líneas B y la identificación de consolidaciones pulmonares mediante el broncograma dinámico. Asimismo, se analiza la evaluación de la interacción cardiopulmonar, resaltando cómo la ventilación mecánica puede afectar la función cardíaca y cómo la ecografía permite evaluar estos efectos en tiempo real.

Un apartado especial está dedicado a la ventilación mecánica, explorando los cambios fisiológicos que introduce en el sistema respiratorio y el papel de la ecografía en su monitorización. Se presentan nuevas estrategias como la ecografía diafragmática para la evaluación del destete ventilatorio y el uso del Lung Ultrasound Score (LUSS) para cuantificar la aireación pulmonar en el SDRA.

Finalmente, se reflexiona sobre el futuro de la ecografía en la fisiología respiratoria, destacando su valor no solo en la práctica clínica, sino también en la enseñanza de la anatomía y fisiología en el pregrado. Aunque la evidencia respalda cada vez más su utilidad, aún queda camino por recorrer para desarrollar protocolos estandarizados y consolidar su rol como una herramienta fundamental en la medicina respiratoria y crítica.

Anatomía Funcional y su Correlación Ecográfica: de la Teoría a la Imagen

La fisiología pulmonar descrita por West, considerada una referencia fundamental para los estudiantes de medicina en su aprendizaje de la fisiología respiratoria, habla de la relación entre la estructura y función del sistema respiratorio. Aspectos como la ventilación, la perfusión y la relación entre ambas son clave para comprender el intercambio de gases en los alvéolos. West detalla cómo la gravedad afecta la distribución de la ventilación y la perfusión, creando zonas pulmonares con distintas relaciones ventilación-perfusión (V/Q). Esta base fisiológica encuentra un correlato clínico y práctico en la ecografía pulmonar, una herramienta que Daniel Lichtenstein revolucionó mediante la identificación de patrones ecográficos como las líneas B, indicativas de edema intersticial, las líneas A, asociadas a un pulmón aireado normal, y las consolidaciones pulmonares, que reflejan alteraciones significativas de la relación V/Q.

La integración de los principios fisiológicos de West con las contribuciones de Lichtenstein permite una evaluación más completa y dinámica del sistema respiratorio. Por ejemplo, la ecografía permite identificar áreas con disminución o ausencia de deslizamiento pleural, sugiriendo atelectasias o neumotórax, y visualizar consolidaciones o derrames pleurales que alteran la perfusión pulmonar. Además, la capacidad de evaluar cambios en la distribución de estas características en diferentes posiciones del paciente resalta el impacto de la gravedad, alineándose con las teorías de West. Esta integración de teoría y práctica no solo mejora el entendimiento académico de la fisiología respiratoria, sino que también amplía la capacidad diagnóstica y terapéutica en la práctica clínica.

Física del Ultrasonido y Términos Relevantes

La ecografía se basa en la emisión de ondas sonoras de alta frecuencia que viajan a través de los tejidos del cuerpo. Estas ondas son generadas por un cristal piezoeléctrico ubicado en el transductor del equipo ecográfico, el cual convierte energía eléctrica en vibraciones mecánicas. Estas vibraciones producen ondas ultrasónicas que se propagan por los tejidos y, al encontrar diferentes interfaces (cambios en la densidad y elasticidad de los tejidos), parte de estas ondas son reflejadas de regreso al transductor.

El transductor recibe estas ondas reflejadas, conocidas como ecos, y las convierte nuevamente en señales eléctricas que el equipo ecográfico procesa para generar una imagen bidimensional. La calidad de estas imágenes depende de la interacción entre las ondas y los tejidos, dando lugar a artefactos y patrones característicos.

Modos de Ultrasonido

1. **Modo 2D (bidimensional):** Representa una imagen en tiempo real de las estructuras anatómicas en una escala de grises. Es el modo principal para la evaluación estructural.
2. **Modo M (movimiento):** Muestra un gráfico en el tiempo que refleja el movimiento de las estructuras, útil para evaluar el diafragma y la dinámica de las paredes torácicas.
3. **Doppler color:** Permite evaluar el flujo sanguíneo en color, diferenciando dirección y velocidad. Es fundamental en la evaluación de vasos pulmonares y cardíacos.
4. **Doppler tisular:** Evalúa los movimientos del tejido, como los del miocardio, siendo valioso en la interacción cardiopulmonar.

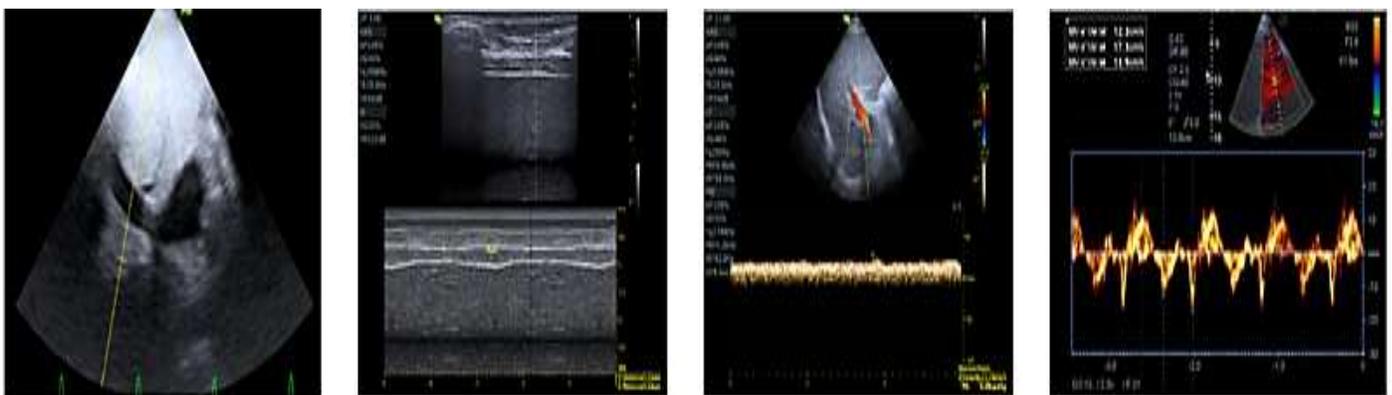


Figura 1: Modos de Ultrasonido. La imagen ilustra los modos de ultrasonido más comúnmente utilizados. De izquierda a derecha, se muestran ejemplos de modo 2D, modo M, Doppler color y Doppler tisular, respectivamente.

Tipos de transductores

- **Transductor lineal:**

- **Características:** Frecuencia alta (7-15 MHz), excelente resolución para estructuras superficiales.
- **Pros:** Detalle anatómico fino, ideal para evaluar pleura y estructuras cercanas.
- **Contras:** Penetración limitada, no es útil para estructuras profundas.

- **Transductor convexo:**

- **Características:** Frecuencia más baja (2-6 MHz), mayor penetración.
- **Pros:** Amplio campo de visión, útil para estructuras más profundas como bases pulmonares y el diafragma.
- **Contras:** Resolución inferior en estructuras superficiales.

- **Transductor microconvexo:**

- **Características:** Combina una cabeza más pequeña con frecuencias intermedias (3-8 MHz).
- **Pros:** Buen compromiso entre resolución y penetración, permite maniobrar en áreas pequeñas como entre costillas.
- **Contras:** Campo de visión algo más limitado en comparación con los transductores convexos estándar y no está disponible en la mayoría de servicios de salud.



Figura 2: Transductores. De izquierda a derecha, se muestran los transductores más comúnmente utilizados para la ecografía pulmonar: lineal, sectorial (matriz en fase) y convexo. Nota: El transductor microconvexo no se utiliza comúnmente debido a su disponibilidad limitada en la mayoría de las unidades. En su lugar, se puede emplear el transductor sectorial (cardíaco), que, con una configuración adecuada y en manos entrenadas, puede ser la herramienta más útil para este tipo de estudio.

Términos Relevantes.

- Eco: El retorno de las ondas ultrasónicas tras reflejarse en una interfaz tisular.
- Reverberación: Artefacto causado por múltiples reflexiones entre el transductor y una superficie reflectante, que genera líneas equidistantes en la imagen.
- Artefacto: Fenómenos que no representan estructuras anatómicas reales, como las líneas A y B, que son útiles para interpretar hallazgos clínicos.
- Anecoico: Áreas en la imagen ecográfica que no reflejan ecos y aparecen negras, como los líquidos.
- Hiperecogénico: Estructuras que reflejan gran cantidad de ondas, apareciendo blancas en la imagen.
- Hipoecogénico: Estructuras que reflejan pocas ondas, apareciendo más grises en la escala.

Estos conceptos son fundamentales para interpretar correctamente los hallazgos ecográficos y comprender cómo las propiedades físicas del ultrasonido influyen en la formación de imágenes diagnósticas.

Evaluación Ecográfica de los Pulmones y el Diafragma

Introducción

Durante mucho tiempo se consideró que la ecografía pulmonar era una técnica inviable debido a la naturaleza del aire como barrera para la propagación de ondas ultrasónicas. Este escepticismo inicial limitó el desarrollo de la ultrasonografía en el ámbito respiratorio, ya que se asumía que las imágenes obtenidas carecerían de valor diagnóstico. Sin embargo, en la década de 1990, Daniel Lichtenstein demostró que la ecografía pulmonar no solo es viable, sino una herramienta de gran utilidad para evaluar la fisiología pulmonar en tiempo real. Esta técnica, relativamente joven en comparación con otras modalidades de imagen, ha abierto un campo amplio de exploración para aumentar el número de patologías que se pueden diagnosticar y monitorear con precisión.

Importancia clínica

La ecografía pulmonar y diafragmática representa una herramienta invaluable para explorar la fisiología respiratoria en tiempo real. Basada en los principios detallados por West, esta técnica permite visualizar fenómenos como el equilibrio ventilación-perfusión (V/Q), que es esencial para el intercambio gaseoso. Además, Lichtenstein demostró que la ecografía pulmonar puede detectar rápidamente alteraciones como el neumotórax, derrames pleurales y consolidaciones, proporcionando información fisiológica directa que complementa el enfoque teórico.

Técnica

Evaluación del deslizamiento pleural

La línea pleural es una estructura clave en la ecografía pulmonar y representa la interfaz entre la pleura parietal y la visceral. Su evaluación precisa requiere atención a la técnica y al uso del transductor correcto.

- **Transductor recomendado:** Se utiliza un transductor lineal de alta frecuencia (7-15 MHz) para maximizar la resolución en estructuras superficiales. En caso de que se requiera mayor penetración, se puede emplear un transductor microconvexo o convexo, aunque a costa de una menor resolución superficial.
- **Ubicación del transductor:** El transductor debe colocarse inicialmente en el segundo o tercer espacio intercostal, perpendicular al tórax (a 90 grados) y con la muesca orientada hacia la cabeza del paciente. Esta posición permite identificar el "signo del murciélago", donde se observan las costillas como estructuras hiperecogénicas con sombras acústicas posteriores, y la línea pleural aparece como una línea hiperecogénica entre las costillas. La región anterolateral del tórax es ideal

para iniciar la exploración, ya que esta zona es accesible y facilita la visualización de la línea pleural.

- **Estructuras esperadas:**

- **Línea pleural:** Aparece como una línea hiperecogénica que se mueve de forma sincronizada con la respiración. El deslizamiento pleural representa el movimiento relativo de las pleuras parietal y visceral en su espacio "virtual" durante la ventilación. Este movimiento es un reflejo directo de la expansión y contracción del pulmón en contacto con la pared torácica, impulsado por la presión negativa en el espacio pleural y la contracción muscular. Su visualización indica la ausencia de neumotórax y una conexión funcional entre ambas capas pleurales.
- **Espacios intercostales:** Se identifican las costillas como estructuras hiperecogénicas con sombra acústica posterior.



Figura 3. Imagen de ecografía pulmonar obtenida con un transductor lineal. La flecha azul indica la línea pleural dentro del espacio intercostal, mientras que las líneas rojas resaltan la sombra acústica posterior causada por la densidad cálcica de las costillas. El siguiente enlace muestra un video demostrando el deslizamiento pleural.

<https://www.instagram.com/p/DCIdyXyu2Ro/?igsh=MTRob2NybHN1NWdhag==>

Artefactos pulmonares:

Líneas A

- **Qué son:** Artefactos horizontales hiperecogénicos paralelos a la línea pleural.
- **Físicamente cómo se forman:** Resultan de la reflexión múltiple de las ondas ultrasónicas entre la pleura y el transductor debido al aire alveolar.
- **Cómo se ven:** Aparecen como líneas paralelas equidistantes bajo la línea pleural.
- **Qué significan:** Representan un pulmón aireado y normal. Su presencia sugiere la ausencia de líquido o colapso alveolar.



Figura 4. Imagen ecográfica del tejido pulmonar obtenida con un transductor sectorial. A la izquierda, se muestra una representación esquemática de los artefactos hiperecogénicos repetitivos originados en la pleura, característicos de un pulmón aireado y sano. A la derecha, se presenta la imagen ecográfica real, ilustrando cómo se visualizan estos hallazgos en la práctica clínica.

Líneas B

- **Qué son:** Artefactos verticales hiperecogénicos que parten de la línea pleural y se extienden hacia la profundidad sin atenuarse.
- **Físicamente cómo se forman:** Se producen por la interacción de las ondas ultrasónicas con pequeñas cantidades de líquido intersticial dentro del pulmón.
- **Cómo se ven:** Se asemejan a "rayos de luz" o "luces de concierto" estas cruzan todo el campo ecográfico desde la línea pleural.
- **Qué significan:** Indican presencia de líquido intersticial o alveolar, asociado a edema pulmonar, síndrome de distrés respiratorio o fibrosis pulmonar.

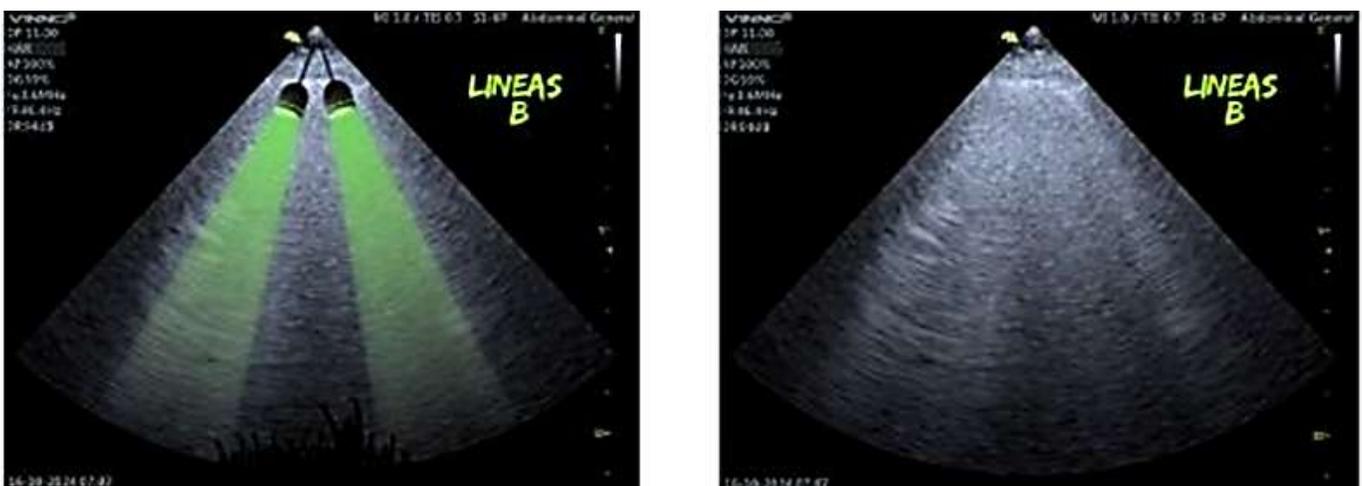


Figura 5. Imagen ecográfica del tejido pulmonar obtenida con un transductor sectorial. A la derecha, se observan líneas B, similares a haces de luz en un concierto. A la izquierda, se identifican artefactos hiperecogénicos verticales que emergen desde la línea pleural y se extienden hasta la parte inferior de la ventana ecográfica. Es importante ajustar la profundidad de la ventana ecográfica a 10 cm para una adecuada visualización.

Patrón mixto

- **Qué es:** Una combinación de líneas A y B presentes en el mismo campo ecográfico.
- **Físicamente cómo se forma:** Refleja áreas pulmonares heterogéneas con coexistencia de aire y líquido en el mismo espacio pulmonar.
- **Cómo se ve:** Zonas con predominio de líneas A intercaladas con zonas de líneas B.
- **Qué significa:** Puede indicar una patología pulmonar en evolución, como una consolidación parcial o una neumonía en fase inicial.

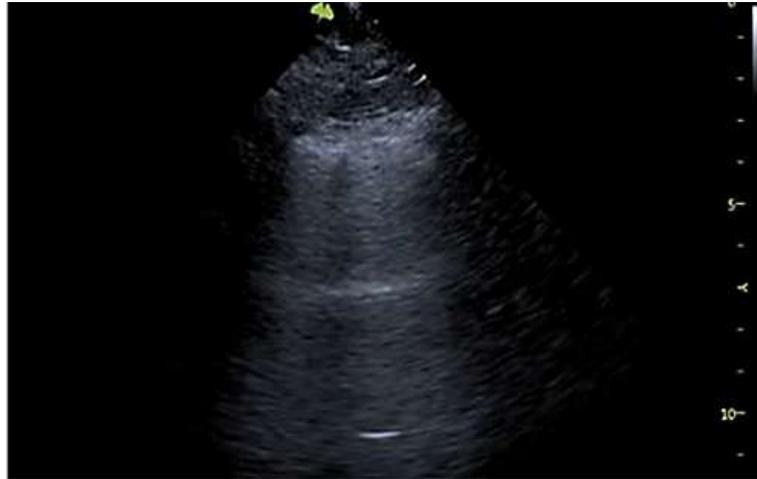


Figura 6: Imagen ecográfica del tejido pulmonar obtenida con un transductor sectorial. En la imagen se observan líneas A combinadas con líneas B. En una exploración en tiempo real, las líneas A permanecen estáticas, mientras que las líneas B se desplazan con el ritmo respiratorio del paciente.

Técnica específica

El paciente debe estar en posición supina o semi-Fowler. Se solicita que respire de manera tranquila mientras se inspeccionan múltiples puntos en ambos hemitórax, siguiendo el protocolo BLUE:

- **Punto Anterior Superior:** Localizado en el segundo espacio intercostal, línea paraesternal.
- **Punto Anterior Inferior:** Localizado en el cuarto o quinto espacio intercostal, línea media clavicular.
- **Punto Lateral:** En el quinto o sexto espacio intercostal, línea axilar media.
- **Punto Posterior Inferior:** En la región posterolateral, hacia la base pulmonar.
- Estos puntos permiten una evaluación sistemática de los pulmones para identificar patologías como neumotórax, derrames pleurales y consolidaciones, de manera comparativa cómo se haría en la auscultación pulmonar.

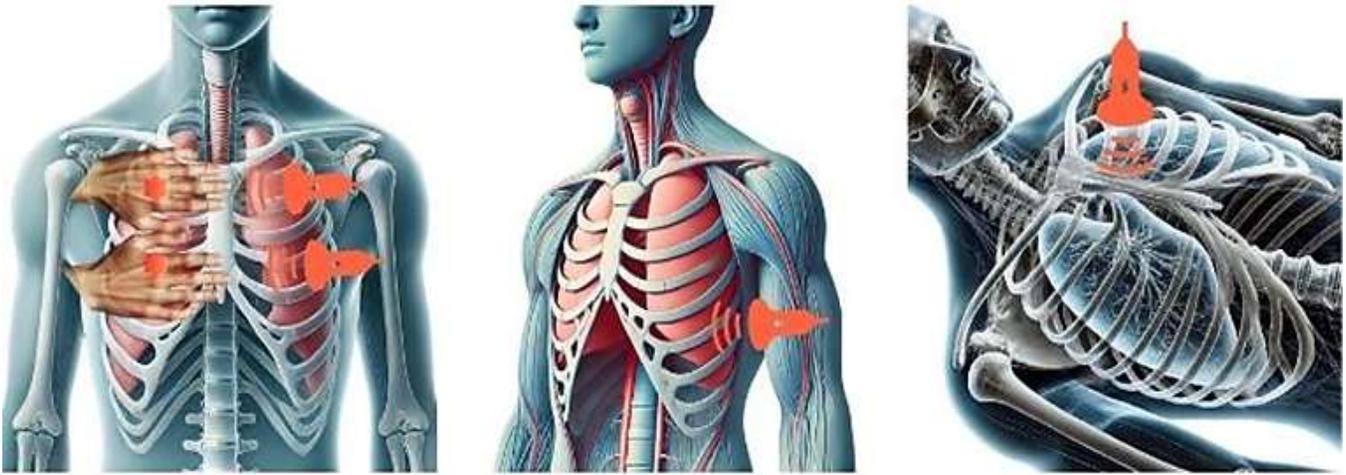


Figura 7: Puntos de insonación en la ecografía pulmonar. La primera imagen muestra los puntos de insonación anteriores utilizando las manos como referencia anatómica; la mano izquierda se coloca con el borde externo del quinto dedo apoyado en el borde inferior de la clavícula, donde el primer punto de insonación se ubica aproximadamente a la altura de la tercera articulación metacarpofalángica. Luego, la mano derecha se posiciona inmediatamente debajo de la izquierda, determinando el segundo punto de insonación a la altura de la segunda articulación metacarpofalángica. La imagen central muestra el punto PLAPS, que se encuentra a la misma altura que el segundo punto de insonación, pero desplazando el transductor hasta la línea axilar media y posterior, con la orientación dirigida hacia la apófisis xifoides del esternón. Finalmente, la última imagen ilustra la orientación adecuada del transductor en relación con el tórax, donde este debe posicionarse a 90° con respecto al pulmón, asegurando que la parte media del transductor se encuentre alineada con el espacio intercostal correspondiente para una insonación óptima del tejido pulmonar.

Base pulmonar

Ubicación: Coloque el transductor en los flancos, con orientación longitudinal o transversal, enfocándose en las áreas posteriores y basales del tórax. Es importante inspeccionar el llamado "punto PLAPS" (Posterior and Lateral Alveolar and/or Pleural Syndrome), que representa las zonas pulmonares más dependientes de la gravedad donde tienden a acumularse líquido o consolidaciones. Este término, introducido por Lichtenstein, destaca la relevancia de estas áreas para identificar derrames pleurales o consolidaciones que podrían pasar desapercibidas en otras posiciones. Coloque el transductor en los flancos, con orientación longitudinal o transversal, enfocándose en las áreas posteriores y basales del tórax.

Neumotorax

Fisiológicamente, el neumotórax representa la acumulación de aire en el espacio pleural, lo que genera un colapso parcial o total del pulmón al eliminar la presión negativa que normalmente mantiene la pleura visceral adherida a la parietal. Esto interfiere en la capacidad del pulmón para expandirse adecuadamente durante la ventilación. En la ecografía, se evidencia por la ausencia de deslizamiento pleural, lo que indica que la pleura visceral no se mueve junto con la parietal debido a la separación por aire. Además, el signo

característico del "lung point" (punto pulmonar) puede observarse, donde se aprecia la transición entre el área con deslizamiento pleural y el área sin deslizamiento, confirmando la presencia de un neumotórax. Este hallazgo es específico y, junto con la ausencia de líneas B, refuerza el diagnóstico.



Figura 8. Neumotórax. En la imagen central, el tejido pulmonar es visualizado con un transductor convexo, mostrando una línea pleural sin deslizamiento, pero con oscilación leve debido al ciclo ventilatorio. La primera imagen muestra una exploración en modo M, donde la transición del signo de la playa al signo del código de barras se debe a la separación de la pleura parietal de la pleura visceral por la presencia de aire. En la última imagen, una tomografía computarizada de tórax ilustra el punto pulmonar, señalado por la flecha azul, que representa la zona de separación pleural donde ocurre el fenómeno descrito previamente.

Edema pulmonar

Fisiológicamente, el edema pulmonar es el resultado de un desequilibrio entre la presión hidrostática y oncótica en los capilares pulmonares, lo que provoca la extravasación de líquido al intersticio y, en casos avanzados, al espacio alveolar. Esto afecta la difusión de gases y la ventilación, generando hipoxemia y alteraciones en la relación ventilación-perfusión (V/Q).

En la ecografía, el edema pulmonar se evidencia a través de múltiples líneas B, que son artefactos verticales hiperecogénicos que se extienden desde la línea pleural hasta la profundidad del campo sin atenuarse. Estas líneas B se producen cuando las ondas ultrasónicas interactúan con septos interlobulillares engrosados y llenos de líquido, generando reverberaciones que se manifiestan como haces brillantes en la imagen ecográfica. La presencia de múltiples líneas B en ambos hemitórax sugiere un edema intersticial difuso, mientras que su distribución focal puede estar relacionada con neumonía o síndrome de distrés respiratorio agudo (SDRA). Figura 5.

Derrame pleural

Fisiológicamente, el derrame pleural se produce por un desequilibrio entre la producción y la reabsorción de líquido pleural. Este líquido normalmente lubrica el espacio entre la pleura parietal y visceral, facilitando el movimiento pulmonar. Cuando se acumula en exceso debido a aumento de la presión hidrostática (como en insuficiencia cardiaca), disminución de la presión oncótica (como en síndrome nefrótico o hepatopatías), inflamación pleural (como en infecciones) o trauma, se genera un derrame pleural. Dependiendo de su composición, el líquido pleural puede ser seroso (trasudado), contener proteínas y células inflamatorias (exudado), sangre (hemotórax) o pus (empiema).

En la ecografía, el derrame pleural se observa como una colección anecoica o hipocóica en el espacio pleural, desplazando las estructuras pulmonares adyacentes. Su movilidad con la respiración y la presencia de septos internos pueden ayudar a diferenciar entre un trasudado y un exudado. En el caso de hemotórax o empiema, el líquido puede mostrar ecos internos debido a la presencia de células, fibrina o material purulento. La ecografía es altamente sensible para la detección de derrames pleurales, incluso en volúmenes pequeños que pueden pasar desapercibidos en la radiografía de tórax.



Figura 9. Derrame pleural. Imagen obtenida con un transductor sectorial en el punto PLAPS izquierdo. De derecha a izquierda, se identifican el riñón, el bazo y la cavidad torácica hipocóica (negra). En condiciones normales, el tejido pulmonar sano muestra un patrón de líneas A. Sin embargo, cuando hay ocupación líquida, ya sea líquido pleural o sangre, la cavidad torácica adquiere un aspecto hipocóico. Se destaca una línea curva hiperecogénica (blanca) entre la cavidad torácica y el bazo, la cual corresponde al diafragma.

Consolidaciones

Fisiológicamente, las consolidaciones pulmonares representan la pérdida de la aireación alveolar debido a la acumulación de líquido, células inflamatorias o material purulento dentro de los alvéolos. Se pueden originar por distintos mecanismos, siendo los más comunes la neumonía y la atelectasia. La neumonía provoca inflamación y exudado en los alvéolos, comprometiendo el intercambio gaseoso y generando una

disminución en la compliance pulmonar. En cambio, la atelectasia se produce por la obstrucción de una vía aérea o por compresión externa, causando el colapso alveolar sin presencia de inflamación significativa.

En la ecografía, las consolidaciones se observan como áreas pulmonares con una apariencia hepaticada, es decir, con una ecogenicidad similar al hígado debido a la falta de aire. Un hallazgo clave para diferenciar la neumonía de la atelectasia es el broncograma dinámico: en la neumonía, los bronquios llenos de aire pueden moverse con la ventilación, lo que indica que aún existe cierto grado de flujo aéreo; en la atelectasia, el broncograma tiende a ser estático debido a la ausencia de ventilación en la zona afectada.

Otra herramienta útil para diferenciar estas entidades es el Doppler color. En la neumonía, debido a la inflamación y el aumento del flujo sanguíneo en el parénquima afectado, se puede visualizar una señal de vascularización dentro del área consolidada. En contraste, en la atelectasia, donde la perfusión está reducida o ausente, el Doppler color mostrará escasa o nula vascularización.

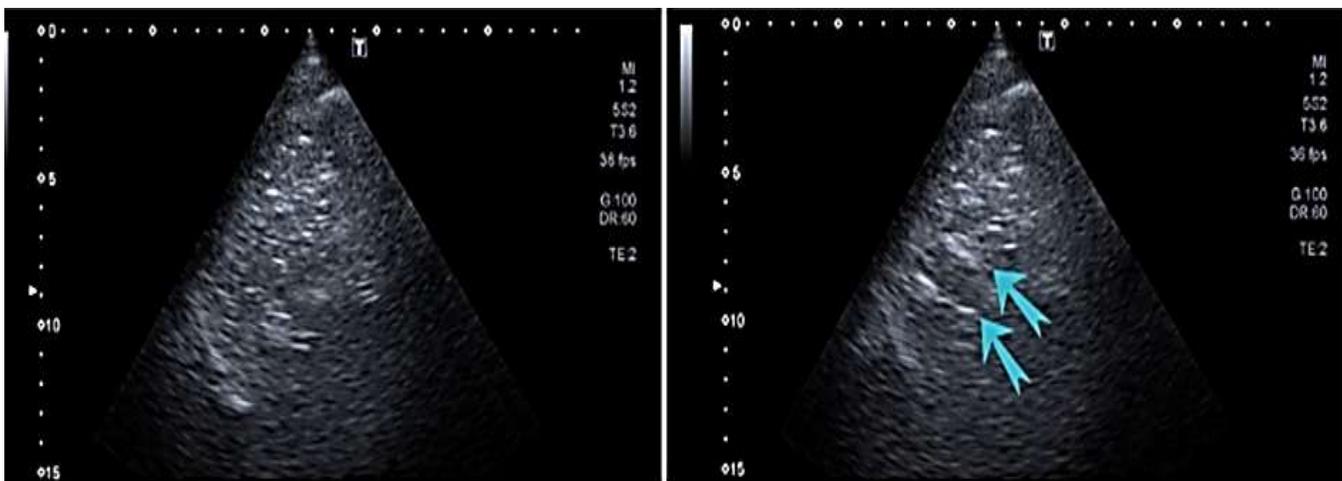


Figura 10. Neumonía. Imagen de tejido pulmonar obtenida con un transductor sectorial en modo 2D. Se presentan dos capturas de un clip de video. En la imagen de la izquierda, el pulmón muestra un aspecto hepaticado, característico de la consolidación pulmonar. En la imagen de la derecha, se observan dos líneas hiperecogénicas (blancas) que se desplazan de manera sincronizada con la respiración, un hallazgo conocido como broncograma dinámico. El video completo puede visualizarse en el siguiente enlace

<https://www.instagram.com/reel/DCXweYGOSFq/?igsh=MWR1aDBqbnZybmttaA==>

Evaluación de la Interacción Cardio-Pulmonar

Importancia clínica

La interacción cardiopulmonar es un concepto central en la fisiología respiratoria, que aborda cómo las variaciones en la ventilación afectan al corazón y viceversa. El estudio de esta interacción es crucial, ya que el adecuado llenado y vaciamiento de las cavidades cardíacas depende de la presión intratorácica y del retorno venoso. Alteraciones en estos mecanismos pueden llevar a consecuencias fisiopatológicas significativas.

Por ejemplo, un fallo en el llenado adecuado del ventrículo derecho debido a un aumento en la presión intratorácica (como en un neumotórax a tensión o en un taponamiento cardíaco) puede reducir el gasto cardíaco y comprometer la perfusión tisular. A la inversa, condiciones que generan insuficiencia cardíaca y aumento en la presión venosa central pueden inducir congestión pulmonar y dificultar la adecuada ventilación y oxigenación. Figura 11.

La ecografía permite evaluar esta relación de manera dinámica, especialmente en pacientes con alteraciones críticas, al analizar la respuesta del corazón a cambios en la ventilación, las variaciones en el diámetro de la vena cava inferior (VCI) como marcador de precarga y el impacto del esfuerzo respiratorio sobre la función ventricular.

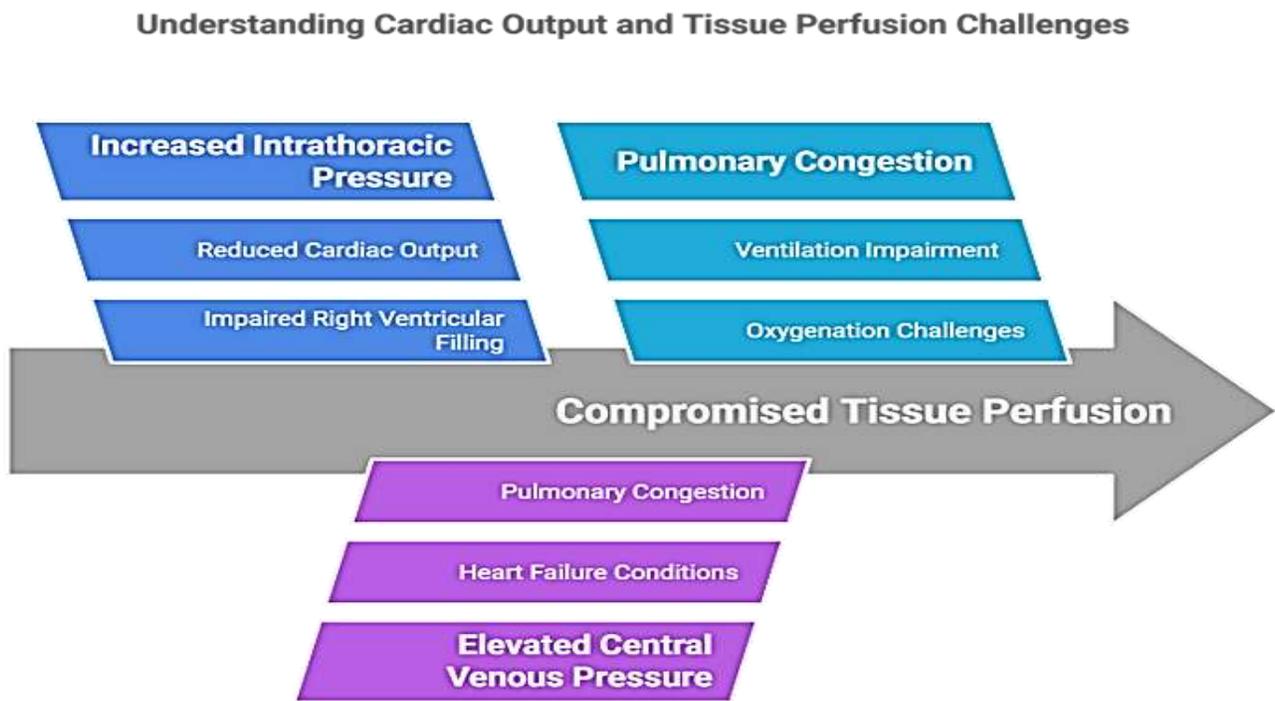


Figura 11. mecanismos de interacción cardiopulmonar.

Técnica

Para la evaluación ecográfica de la interacción cardiopulmonar, se utilizan diferentes ventanas cardiacas para obtener imágenes de las estructuras cardíacas y su relación con la ventilación.

- Transductor recomendado: Se recomienda el uso de un transductor sectorial o phased-array de baja frecuencia (1-5 MHz) debido a su capacidad de penetración y su campo de visión estrecho, lo que facilita la evaluación de estructuras profundas como el corazón a través de espacios intercostales reducidos.

Ventanas ecocardiográficas y sus vistas

- Ventana subcostal: Se coloca el transductor en el epigastrio, con la muesca orientada hacia la cabeza del paciente. Permite evaluar el eje largo del corazón y la vena cava inferior (VCI), siendo útil en pacientes con dificultad para obtener imágenes por otras ventanas.
- Ventana paraesternal: Se posiciona el transductor en el tercer o cuarto espacio intercostal, en la línea paraesternal izquierda, con la muesca dirigida hacia el hombro derecho. Es ideal para evaluar la función del ventrículo izquierdo y la relación entre las cavidades derechas e izquierdas.
- Ventana apical: Se coloca el transductor en el ápex cardíaco, con la muesca orientada hacia la cabeza del paciente. Esta vista proporciona una imagen clara de las cuatro cavidades cardíacas y permite una evaluación precisa de la función ventricular y valvular.
- Ventana supraesternal: Se ubica el transductor en la fosa supraesternal, con la muesca dirigida hacia la base del cuello. Se emplea para visualizar el arco aórtico y evaluar flujos en grandes vasos.

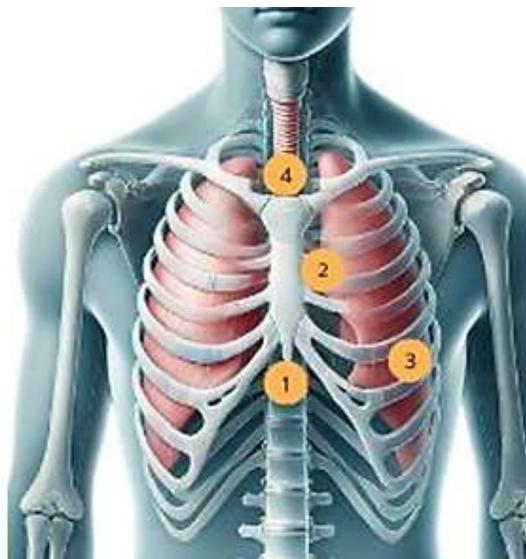


Figura 12: Ventanas ecocardiográficas. La imagen muestra las principales ventanas ecocardiográficas: (1) ventana subxifoidea, (2) ventana paraesternal, (3) ventana apical y (4) ventana supraesternal.

Vena cava inferior (VCI)

La evaluación de la VCI es fundamental como marcador de precarga. Se mide su diámetro y su variabilidad con la respiración:

- Un colapso respiratorio $> 50\%$ sugiere hipovolemia.
- Una VCI dilatada sin colapso indica aumento de presión venosa central, como en insuficiencia cardíaca derecha o taponamiento cardíaco.

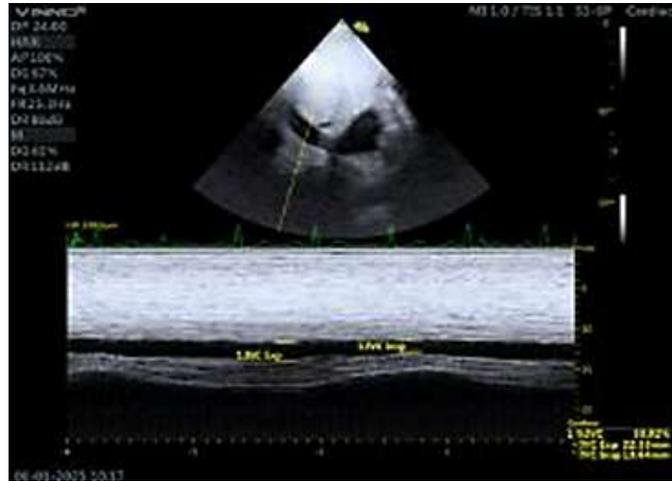


Figura 13: Colapso de la Vena Cava Inferior (VCI). Imagen ecográfica de la aurícula derecha y la VCI, obtenida con un transductor sectorial en modo 2D (arriba) y modo M (abajo). Esta técnica se utiliza para evaluar el colapso respiratorio de la VCI y estimar, de manera indirecta, una parte del estado de precarga del paciente. La medición se realiza determinando el diámetro de la VCI durante la espiración y la inspiración, calculando luego el promedio de ambos valores. Nota: El grado de colapso de la VCI, por sí solo, no es un predictor absoluto del estado de precarga, pero es un parámetro adicional a considerar en su evaluación.

Ultrasonido Doppler

Se emplean técnicas de Doppler color y Doppler pulsado para analizar patrones de flujo en válvulas, evaluar gasto cardíaco y su impacto en la función pulmonar.

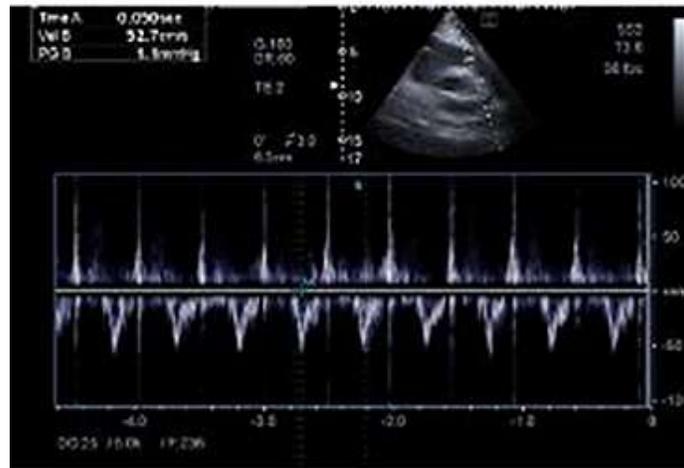


Figura 14: Doppler pulsado. En la parte superior de la imagen, se observa un corte en modo 2D supraesternal de eje corto, obtenido con un transductor sectorial. En la parte inferior, se muestra la representación de Doppler pulsado, correspondiente al flujo sanguíneo a través de la válvula pulmonar. En este caso, la presencia de baja velocidad de flujo y una muesca mesosistólica sugieren hipertensión pulmonar, posiblemente secundaria a un tromboembolismo pulmonar (TEP) agudo.

Hallazgos clave

Relación Ventilación-Perfusión (V/Q)

La V/Q es un determinante fundamental en el intercambio gaseoso pulmonar. En condiciones normales, la ventilación alveolar debe estar bien equilibrada con la perfusión capilar pulmonar para garantizar una oxigenación adecuada. Sin embargo, alteraciones en esta relación pueden provocar hipoxemia.

- Un aumento en la ventilación sin perfusión adecuada genera un espacio muerto fisiológico, como ocurre en el tromboembolismo pulmonar.
- Una perfusión sin ventilación efectiva lleva a un shunt pulmonar, como en la neumonía o el edema pulmonar.
- La ecografía permite detectar estas alteraciones mediante hallazgos como consolidaciones pulmonares o la presencia de líneas B difusas, que reflejan alteraciones en el intercambio de gases.

Understanding V/Q Ratio Imbalances in Pulmonary Conditions

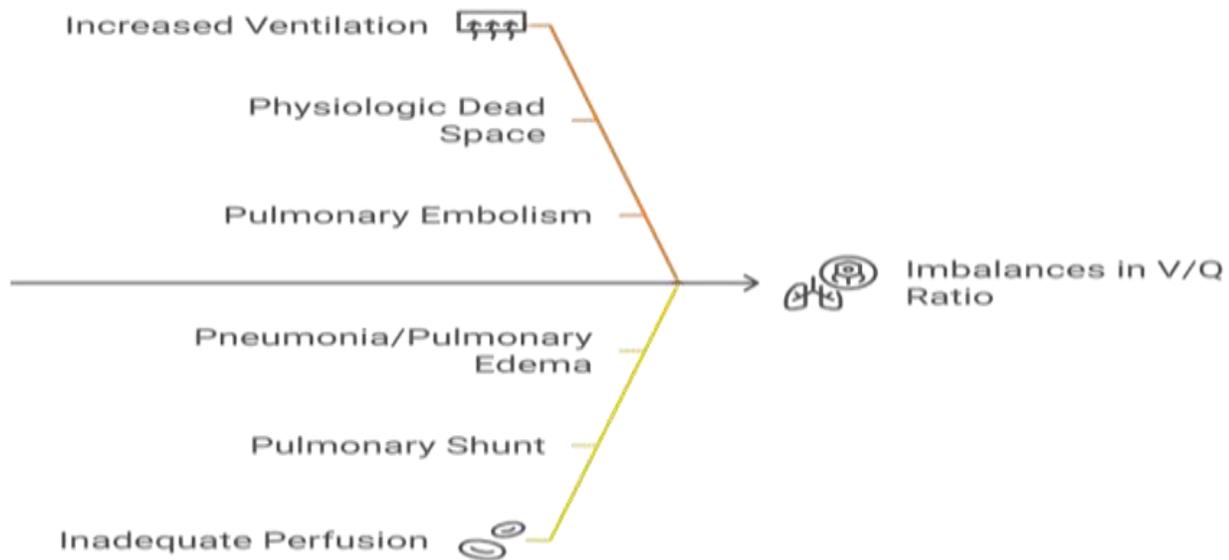


Figura 15. Relación V/Q. La relación ventilación-perfusión (V/Q) es esencial para el intercambio gaseoso pulmonar. Un aumento de la ventilación sin una perfusión adecuada crea espacio muerto fisiológico (por ejemplo, tromboembolismo pulmonar), mientras que la perfusión sin ventilación efectiva conduce a un shunt pulmonar (por ejemplo, neumonía, edema pulmonar).

Hipoxemia y sus tipos

La hipoxemia se define como una disminución de la presión arterial de oxígeno (PaO_2) y puede clasificarse en:

- Hipoxemia hipoxémica: Se debe a un defecto en la oxigenación pulmonar, como en la neumonía o el síndrome de distrés respiratorio agudo (SDRA). La ecografía puede mostrar consolidaciones y patrón de líneas B difusas.
- Hipoxemia por hipoventilación: Provocada por disminución del volumen ventilatorio, como en enfermedades neuromusculares. La ecografía puede mostrar movimientos diafragmáticos alterados.
- Hipoxemia por alteraciones en la difusión: Ocurre en enfermedades intersticiales pulmonares donde la barrera alveolocapilar está engrosada. Se pueden observar líneas B múltiples en ecografía.
- Hipoxemia por alteraciones en la V/Q: Resultado de un desequilibrio entre ventilación y perfusión. La ecografía ayuda a identificar regiones de consolidación o atrapamiento aéreo.
- Hipoxemia por shunt verdadero: Presente cuando existe perfusión pulmonar sin ventilación, como en el colapso alveolar severo. La ecografía puede mostrar atelectasias extensas sin broncograma dinámico.

What type of hypoxia is indicated by specific ultrasound findings?

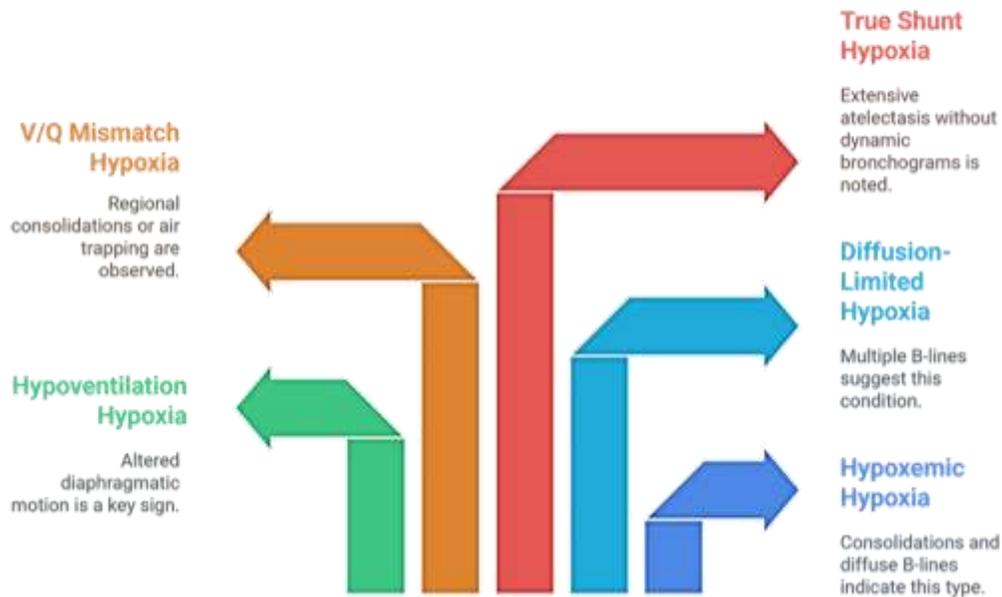


Figura 16: Ejemplos de hallazgos ecográficos en diferentes tipos de hipoxemia.

Función Ventricular Izquierda y Congestión Pulmonar

La función ventricular izquierda es fundamental en la hemodinamia y la perfusión tisular, ya que se encarga de generar el gasto cardiaco necesario para distribuir oxígeno y nutrientes al organismo. Su disfunción puede provocar insuficiencia cardiaca, lo que genera un aumento en la presión venosa pulmonar y puede derivar en congestión pulmonar y edema alveolar, afectando la oxigenación y el intercambio gaseoso.

La ecografía permite evaluar la función ventricular izquierda a través de varias técnicas:

- Fracción de eyección del ventrículo izquierdo (FEVI): Se calcula mediante el método de Simpson en la ventana apical de cuatro cámaras o con la medición del diámetro telediastólico y telesistólico en la ventana paraesternal. Valores reducidos indican disfunción sistólica.
- Doppler tisular: Evalúa la velocidad del movimiento del miocardio, proporcionando información sobre la función diastólica.
- Doppler pulsado en el tracto de salida del ventrículo izquierdo: Permite estimar el gasto cardiaco y evaluar el perfil hemodinámico del paciente.
- Índice E/e': Relación entre la velocidad del flujo mitral (E) y la velocidad del anillo mitral (e') obtenida por Doppler tisular, útil para estimar la presión de llenado del ventrículo izquierdo. Este índice se considera un subrogado de la presión de oclusión de la arteria pulmonar (POAP), también conocida como presión "wedge". La POAP es un marcador indirecto de la presión en la

aurícula izquierda y, por ende, de la precarga ventricular izquierda. Un índice E/e elevado sugiere un aumento en la presión de llenado del ventrículo izquierdo, lo que se asocia con insuficiencia cardíaca diastólica y congestión pulmonar. Ecográficamente, esta alteración puede manifestarse con líneas B bilaterales en la ecografía pulmonar, reflejando edema intersticial, y en casos avanzados, derrame pleural.

Manifestaciones Ecográficas de la Disfunción Ventricular Izquierda

- Líneas B Pulmonares (Difusas, Bilaterales): Indican edema intersticial debido al aumento de la presión hidrostática capilar pulmonar.
- Derrame Pleural (Colección de Líquido Anecoico): Sugiere congestión pulmonar severa en casos de insuficiencia cardíaca avanzada.
- Ecografía Combinada Cardíaca y Pulmonar: Diferencia el edema pulmonar cardiogénico de otras causas, como neumonía o SDRA (Síndrome de Distrés Respiratorio Agudo).

Vena Cava Inferior (VCI) y su Rol en la Interacción Cardiopulmonar

La VCI sirve como un marcador clave del estado de precarga y volumen.

Evaluación Ecográfica de la VCI

- Posicionamiento:
 - Se utiliza un transductor sectorial en la ventana subcostal, con el marcador orientado hacia la cabeza del paciente para obtener una vista longitudinal de la VCI.
- Interpretación:
 - Colapso >50% durante la inspiración: Sugiere hipovolemia y baja presión venosa central.
 - VCI dilatada sin colapso inspiratorio: Indica aumento de la presión venosa central, observado en insuficiencia cardíaca derecha, taponamiento cardíaco o hipertensión pulmonar.

Impacto en la Función Pulmonar

- El aumento de la presión venosa central puede conducir a congestión pulmonar, promoviendo la extravasación de líquido hacia los capilares pulmonares.
- Hallazgos Ecográficos: Las Líneas B pulmonares sugieren edema intersticial.
- La insuficiencia cardíaca derecha o sobrecarga de volumen puede causar derrame pleural bilateral, detectable como colecciones de líquido anecoico en la ecografía pleural.
- La hipertensión pulmonar severa se manifiesta por una VCI dilatada con una aurícula derecha agrandada, reflejando disfunción ventricular derecha, lo que compromete la perfusión pulmonar y la eficiencia del intercambio gaseoso.

Fisiología Respiratoria y Ventilación Mecánica: una Visión Ecográfica

Introducción

La fisiología respiratoria en pacientes sometidos a ventilación mecánica cambia de manera significativa debido a la aplicación de presiones positivas artificiales. A diferencia de la respiración espontánea, donde la expansión pulmonar ocurre por la generación de una presión negativa en la cavidad torácica, en la ventilación mecánica la insuflación pulmonar es impulsada por la presión positiva suministrada por el ventilador. Esto altera la mecánica respiratoria, la interacción cardiopulmonar y la distribución de la ventilación y perfusión, lo que puede tener efectos tanto beneficiosos como perjudiciales dependiendo del ajuste de los parámetros ventilatorios.

La ventilación mecánica puede mejorar la oxigenación y disminuir el trabajo respiratorio en pacientes con insuficiencia respiratoria, pero también puede generar complicaciones como volutrauma, barotrauma y atelectrauma, especialmente si no se ajusta adecuadamente a la fisiología del paciente.

En este contexto, la ecografía pulmonar y diafragmática se ha convertido en una herramienta esencial para la monitorización y seguimiento de la función pulmonar en pacientes ventilados. Permite evaluar la distribución de la ventilación, detectar alteraciones como colapso alveolar, consolidaciones o presencia de líquido en el intersticio y la pleura. Además, la ecografía diafragmática facilita la valoración de la función diafragmática, lo cual es clave en la estrategia de destete de la ventilación mecánica.

El uso sistemático de la ecografía en este contexto permite una optimización de la ventilación mecánica basada en datos fisiológicos en tiempo real, ayudando a personalizar la terapia ventilatoria y mejorar los desenlaces clínicos del paciente.

Utilización de la ecografía en la monitorización, seguimiento y destete en ventilación mecánica

Monitorización en ventilación mecánica

La ecografía ha demostrado ser una herramienta invaluable en la monitorización en tiempo real de pacientes en ventilación mecánica, permitiendo una evaluación rápida de su estado pulmonar y cardiovascular. Su uso proporciona la capacidad de diagnosticar, tratar y evaluar de inmediato la respuesta a intervenciones terapéuticas, lo que la convierte en una técnica esencial en la toma de decisiones en la UCI. A diferencia de otras técnicas de imagen como la radiografía o la tomografía computarizada, la ecografía permite una visualización instantánea de los cambios fisiológicos en respuesta a maniobras

ventilatorias, ajustes de parámetros o procedimientos como la aspiración de secreciones o la colocación en decúbito prono.

Mediante ecografía pulmonar se pueden detectar patrones de consolidación, atelectasia, neumotórax, edema pulmonar o derrames pleurales, lo que permite ajustes inmediatos en la ventilación.

Evaluación de la función diafragmática en pacientes ventilados

La evaluación del diafragma mediante ecografía ha tomado relevancia en el manejo de pacientes ventilados, especialmente en la identificación de disfunción diafragmática inducida por ventilación mecánica (VIDD). Estudios recientes, como el de Santana et al. (2023), han explorado cómo la ecografía puede ser utilizada para monitorizar la actividad diafragmática y optimizar el destete ventilatorio.

Hallazgos recientes y su implicación clínica

Disfunción diafragmática inducida por ventilación mecánica (VIDD)

- La ventilación prolongada puede causar atrofia del diafragma debido a la disminución del esfuerzo respiratorio (desuso) o daño estructural por sobrecarga mecánica.
- La asincronía paciente-ventilador y la ventilación con altos niveles de PEEP pueden alterar la función diafragmática, afectando la eficiencia respiratoria post-extubación.

Monitorización con ecografía

- La excursión diafragmática y la fracción de engrosamiento diafragmático (TF) permiten evaluar la función del diafragma en tiempo real.
- Se ha observado que valores de TF < 20% se correlacionan con fracaso en el destete ventilatorio.

Importancia de la ecografía en el destete ventilatorio

- La ecografía permite diferenciar entre fatiga diafragmática y otros factores que contribuyen al fallo en la extubación.
- Estudios preliminares sugieren que el uso sistemático de la ecografía en la monitorización de la función diafragmática podría mejorar los desenlaces clínicos, aunque se requieren más estudios para validar estos hallazgos.

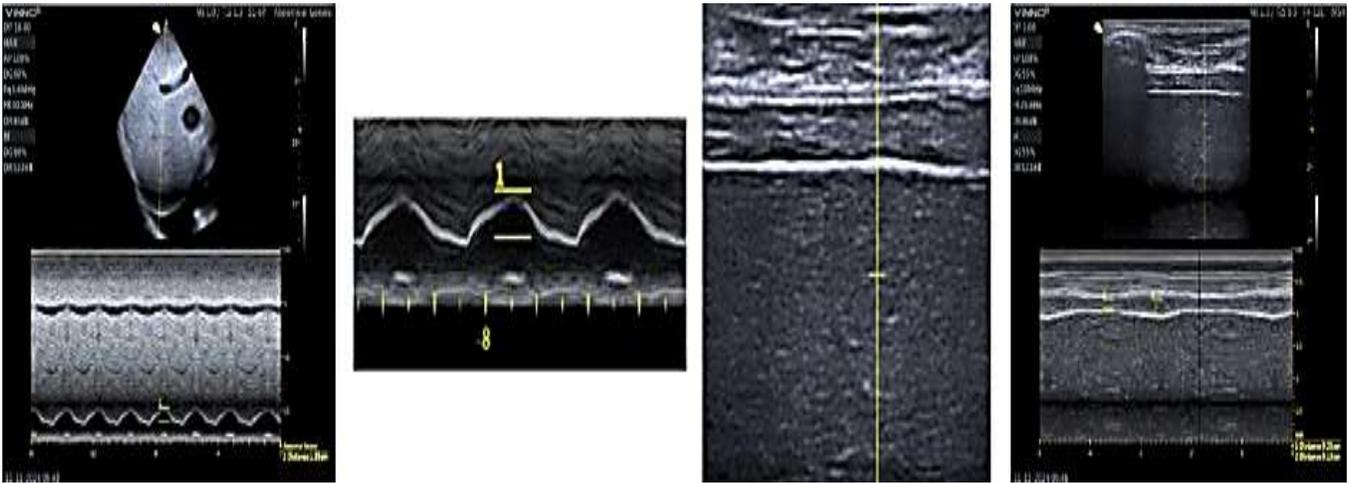


Figura 17: Ecografía diafragmática. La primera imagen muestra una ecografía diafragmática con una vista en modo 2D (parte superior) y su correspondiente representación en modo M (parte inferior). Se observa la línea M (amarilla) atravesando el diafragma con un ángulo cercano a 90° , permitiendo visualizar el movimiento ondulatorio del diafragma y medir su excursión, la cual debe ser mayor a 11 mm para considerarse óptima. En la segunda imagen, el movimiento ondulatorio del diafragma se visualiza con mayor amplitud, destacando la medición del valle al pico de la onda para cuantificar su desplazamiento. La tercera imagen muestra el músculo diafragmático con una resolución mejorada gracias al uso de un transductor lineal. De arriba hacia abajo, se identifican el tejido celular subcutáneo y, por debajo, el diafragma con su apariencia en "sándwich", donde las líneas hiperecogénicas (blancas) representan las pleuras parietal y visceral, y entre ellas se encuentra el tejido muscular diafragmático, de menor ecogenicidad. En la cuarta imagen, se observa una vista similar a la anterior, pero con una medición en modo M, permitiendo evaluar el engrosamiento diafragmático. La medición se realiza en el pico inspiratorio y espiratorio, y el valor óptimo de engrosamiento no debe ser menor al 20%. El modo M proporciona una evaluación en tiempo real, permitiendo visualizar los movimientos oscilatorios del diafragma. Los videos pueden ser consultados en los siguientes enlaces.

<https://www.instagram.com/reel/DCsEV7RzBMA/?igsh=bmU2ZmI2OWRteXEx>

<https://www.instagram.com/reel/DCwMWw1T3Oi/?igsh=ZzRscG9qaHA2dGY5>

Ecografía en la valoración de la aireación pulmonar en el SDRA

La ventilación y la perfusión pulmonar se distribuyen de manera heterogénea dentro del pulmón, lo que ha sido descrito por West en su teoría de las zonas pulmonares. Estas zonas están determinadas por la relación entre la presión alveolar, arterial y venosa, creando regiones con distinta eficiencia en el intercambio gaseoso. En condiciones normales, la ventilación es mayor en las bases pulmonares debido a la gravedad, mientras que en el SDRA, las alteraciones en la mecánica pulmonar pueden modificar esta distribución, llevando a la aparición de atelectasias y colapso alveolar en regiones dependientes.

La ecografía pulmonar permite monitorizar patrones de aireación y reaireación, evaluando la eficacia de estrategias como la titulación de PEEP, el decúbito prono y maniobras de reclutamiento alveolar.

Lung Ultrasound Score (LUSS)

Uno de los métodos más utilizados para cuantificar los cambios en la aireación pulmonar es el Lung Ultrasound Score (LUSS). Este sistema se basa en la asignación de puntajes a diferentes regiones pulmonares evaluadas ecográficamente, dependiendo del grado de pérdida de aireación:

- Puntuación 0: Presencia de líneas A normales, sin líneas B patológicas (pulmón aireado normal).
- Puntuación 1: Presencia de líneas B dispersas, sin consolidaciones (edema intersticial leve).
- Puntuación 2: Coalescencia de líneas B sin consolidaciones (edema intersticial moderado a severo).
- Puntuación 3: Consolidaciones pulmonares extensas con pérdida completa de aireación.

El protocolo LUSS implica la evaluación de múltiples regiones pulmonares dividiendo cada hemitórax en cuatro cuadrantes (anterior superior, anterior inferior, lateral y posterior), sumando los puntajes de cada área para obtener un valor total que refleja la gravedad del compromiso pulmonar. Un puntaje alto indica una mayor afectación y puede utilizarse para evaluar la respuesta a intervenciones como cambios en la PEEP o maniobras de reclutamiento.

El uso de la ecografía pulmonar en el SDRA permite una evaluación dinámica y en tiempo real del estado pulmonar, ayudando a optimizar la estrategia ventilatoria y a evitar efectos adversos como el volutrauma y el atelectrauma.

Monitorización de la interacción cardiopulmonar en ventilación mecánica

En pacientes ventilados, las variaciones inducidas por la ventilación en el gasto cardíaco, presiones de llenado y retorno venoso pueden ser evaluadas con ecografía. La interacción cardiopulmonar es clave en la fisiología del paciente crítico, ya que la ventilación mecánica modifica la mecánica respiratoria y cardiovascular debido a la aplicación de presión positiva intratorácica.

Fisiología de la interacción cardiopulmonar

El corazón y los pulmones están estrechamente relacionados a través de cambios en la presión intratorácica. En la respiración espontánea, la presión negativa generada en la inspiración favorece el retorno venoso al ventrículo derecho (VD) y mejora el llenado ventricular. Sin embargo, en la ventilación mecánica con presión positiva, este mecanismo se invierte, lo que puede reducir el retorno venoso y comprometer el gasto cardíaco, especialmente en pacientes con disfunción del VD.

Efecto de la presión positiva en la mecánica respiratoria y cardiovascular

La presión positiva aumenta la presión alveolar y transpulmonar, reduciendo el colapso alveolar y mejorando la oxigenación.

Puede comprimir la vasculatura pulmonar, aumentando la poscarga del VD y generando disfunción ventricular derecha en pacientes con insuficiencia cardiopulmonar.

En casos graves, esto puede generar interdependencia ventricular, donde la dilatación del VD desplaza el septo interventricular y compromete el llenado del ventrículo izquierdo (VI), reduciendo el gasto cardíaco.

Evaluación ecográfica de la interacción cardiopulmonary

La ecografía permite una evaluación detallada de la función cardiopulmonar y la respuesta del sistema cardiovascular a la ventilación mecánica:

Titulación de PEEP y función ventricular: Se puede evaluar el impacto de la PEEP en la hemodinamia midiendo la variación del diámetro de la VCI, la relación E/e' en el VI y la función del VD.

Función del ventrículo derecho

- **Onda S sistólica del VD** (Doppler tisular): Evalúa la contractilidad del VD y su respuesta a la presión intratorácica.
- **TAPSE** (Tricuspid Annular Plane Systolic Excursion): Evalúa la función sistólica del VD y su capacidad de adaptación a los cambios ventilatorios.
- **MAPSE** (Mitral Annular Plane Systolic Excursion): Evalúa la función sistólica del VI, complementando el análisis de la interacción ventricular.

La Ecografía como Herramienta Clave en la Fisiología Respiratoria

La ecografía se ha consolidado como una herramienta en evolución para la monitorización y evaluación del sistema respiratorio, permitiendo una aproximación dinámica y en tiempo real a la fisiología pulmonar, diafragmática y cardiopulmonar. Su capacidad para visualizar la interacción entre la ventilación y la perfusión, diagnosticar alteraciones respiratorias y guiar intervenciones terapéuticas la convierte en una tecnología invaluable en la atención de pacientes ventilados y no ventilados.

Más allá de su aplicación clínica, la ecografía representa una oportunidad revolucionaria en la enseñanza de la fisiología respiratoria. Integrarla en la formación médica desde el pregrado, especialmente en cátedras de anatomía y fisiología, permitiría a los estudiantes correlacionar estructuras anatómicas con su función en tiempo real, fortaleciendo el aprendizaje y mejorando la comprensión de los mecanismos fisiológicos fundamentales.

Sin embargo, aún queda camino por recorrer. Aunque la evidencia científica respalda cada vez más su uso, es crucial continuar con la investigación para desarrollar guías estandarizadas y protocolos clínicos que optimicen su aplicación. La ecografía pulmonar y diafragmática se encuentra en una etapa de expansión y consolidación, ofreciendo una perspectiva innovadora para el futuro de la medicina respiratoria y la monitorización en cuidados críticos.

Bibliografía

1. Bouhemad B, Liu ZH, Arbelot C, Zhang M, Ferarri F, Le-Guen M, Girard M, Lu Q, Rouby JJ. Ultrasound assessment of antibiotic-induced pulmonary reaeration in ventilator-associated pneumonia. *Crit Care Med* 2010; 38(1):84-92.
2. Lichtenstein D. Lung ultrasound in the critically ill. *Curr Opin Crit Care*. 2014 Jun;20(3):315-22.
3. Tamagnone FM, Previgliano IJ, Merlo PM, Benay CG. Manual práctico de ultrasonografía crítica. POCUS. 2022.
4. Pérez C, Diaz-Caicedo D, Almanza Hernández DF, et al. Critical Care Ultrasound in Shock: A Comprehensive Review of Ultrasound Protocol for Hemodynamic Assessment in the Intensive Care Unit. *J Clin Med* 2024; 13(18):5344.
5. Reardon RF, Ma OJ, Mateer JR. Pocket atlas of emergency ultrasound. McGraw-Hill. 2010.
6. Santana PV, Cardenas LZ, Albuquerque ALP. Diaphragm Ultrasound in Critically Ill Patients on Mechanical Ventilation-Evolving Concepts. *Diagnostics (Basel)* 2023; 13(6):1116.
7. West J B. Fisiología respiratoria: Principios básicos (10ª ed.). Editorial Lippincott. 2020
8. Ecografía en el enfermo crítico (2ª ed.). Información sobre la monitorización ecográfica en ventilación mecánica, evaluación diafragmática y optimización de la ventilación en pacientes críticos.
9. Lichtenstein DA. BLUE-protocol and FALLS-protocol: two applications of lung ultrasound in the critically ill. *Chest* 2015; 147(6):1659–1670.
10. Volpicelli G. Lung sonography. *J Ultrasound Med* 2013; 32(1):165-171.
11. Lichtenstein D, Mezière G, Seitz J. The dynamic air bronchogram. A lung ultrasound sign of alveolar consolidation ruling out atelectasis. *Chest* 2009; 135(6):1421–1425.
12. Lichtenstein D. Lung ultrasound in the critically ill. *Curr Opin Crit Care* 2014; 20(3):315–322.
13. Beshara M, Bittner EA, Goffi A, et al. Nuts and bolts of lung ultrasound: utility, scanning techniques, protocols, and findings in common pathologies. *Crit Care* 2024; 28(1):328.
14. Mesa R (2025, marzo 3). [Perfil de Instagram de Pocusmania]. Instagram. Recuperado de <https://www.instagram.com/pocusmania>
15. Rouby JJ, Arbelot C, Gao Y, et al, APECHO Study Group. Training for Lung Ultrasound Score Measurement in Critically Ill Patients. *Am J Respir Crit Care Med*. 2018; 198(3):398-401.