

Perfusión sin confusión: claves técnicas del TCDE en radiología torácica y patrones de perfusión pulmonar

Yuxin Zhou Shen¹, Gemma Burcet Rodríguez¹, Santiago-Alejandro Bolivar
Cuevas¹, Hector Ignacio Jofre Grimaldo¹, Angela Maria Diaz Cardenas ¹
,Antonio Medina Gomez ¹, Elena Carreño García¹, Belen del Rio Carrero¹.

¹Hospital Universitari de Bellvitge, L'Hospitalet del Llobregat.

Objetivo docente

- Explicar las bases técnicas de la tomografía computarizada de doble energía (DECT) aplicadas al tórax.
 - Mostrar sus principales aplicaciones clínicas en embolia pulmonar aguda y crónica, hipertensión pulmonar, patología oncológica y procesos vasculares.
 - Proponer una semiología práctica de los patrones de perfusión en los mapas de yodo o volumen sanguíneo pulmonar (PBV) y resumir sus limitaciones, artefactos y avances en cuantificación.
-

Revisión del tema

¿Qué aporta la DECT frente a la TC convencional?

- La TC convencional permite una excelente evaluación anatómica, pero ofrece información limitada sobre la composición tisular y la distribución del contraste.
- La DECT:
 - Permite diferenciar materiales mediante adquisición a dos energías.
 - Aísla el yodo como marcador indirecto de perfusión.
 - Genera mapas funcionales superpuestos a la anatomía.
 - Integra en una única adquisición información estructural y funcional.

→ La DECT transforma la angio-TC en una herramienta funcional

Revisión del tema

1. FUNDAMENTOS TÉCNICOS

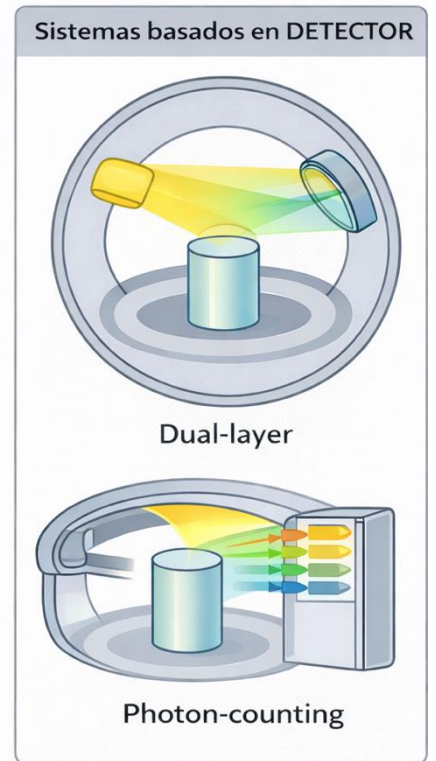
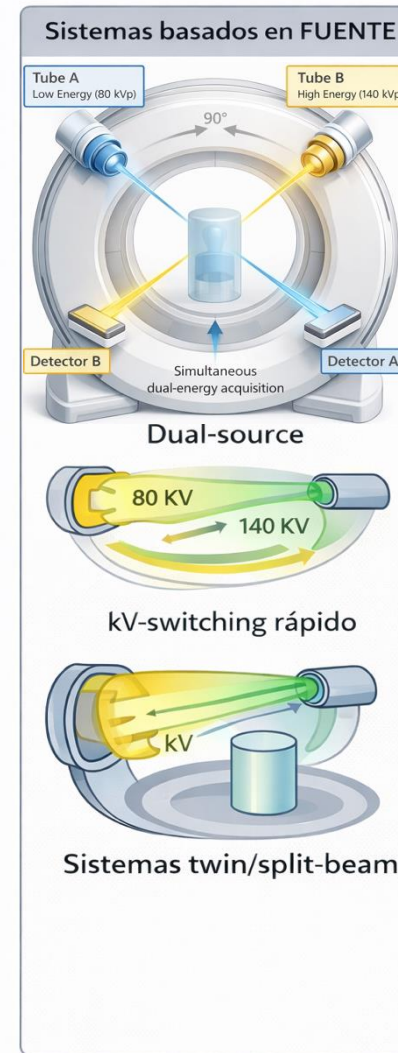
La separación espectral puede lograrse mediante:

Sistemas basados en fuente (source-based):

- **Dual-source** : Dos tubos y dos detectores en el mismo gantry. Cada tubo opera a diferente kV (ej. 80 y 140–150 kV).
- **kV-switching rápido**: Un único tubo alterna rápidamente entre bajo y alto kV durante la rotación.
- **Sistemas twin/split-beam**: Un único haz dividido mediante filtro.

Sistemas basados en detector (detector-based):

- **Detector de doble capa (dual-layer)**: Un único tubo. Detector con dos capas superpuestas.
- **Photon-counting CT**: Detecta fotones individuales y clasifica por energía.



Física resumida

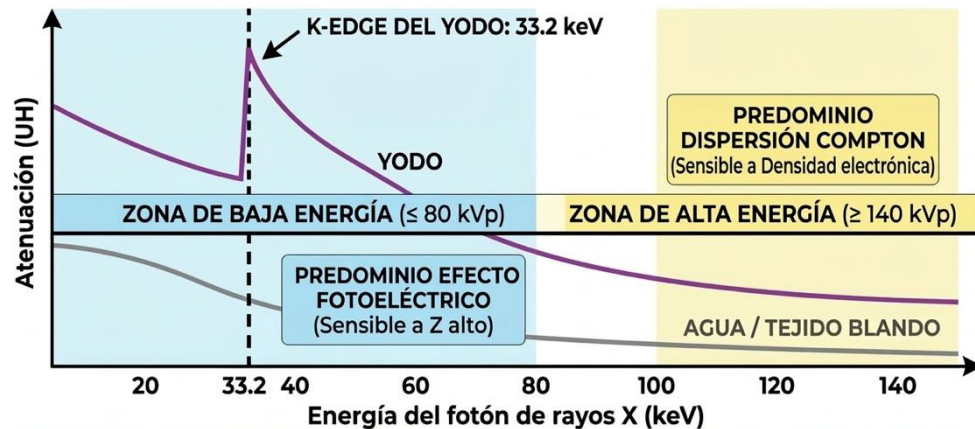
Atenuación dependiente de la energía

La atenuación de los tejidos varía según la energía del haz de rayos X debido a:

- Efecto fotoeléctrico (predominante a baja energía)
- Dispersión Compton (predominante a alta energía)

Cada material presenta una curva característica UH-energía.

FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA ATENUACIÓN EN DUAL ENERGY CT



RESUMEN: La DECT aprovecha la gran diferencia de atenuación entre el Yodo y el Agua/Tejido Blando en energías bajas para diferenciarlos.

Descomposición material-base

Mediante modelos matemáticos:

Cada vóxel se descompone en combinación de materiales base (agua + yodo)



Se genera un mapa cuantitativo de concentración de yodo (mg/mL)

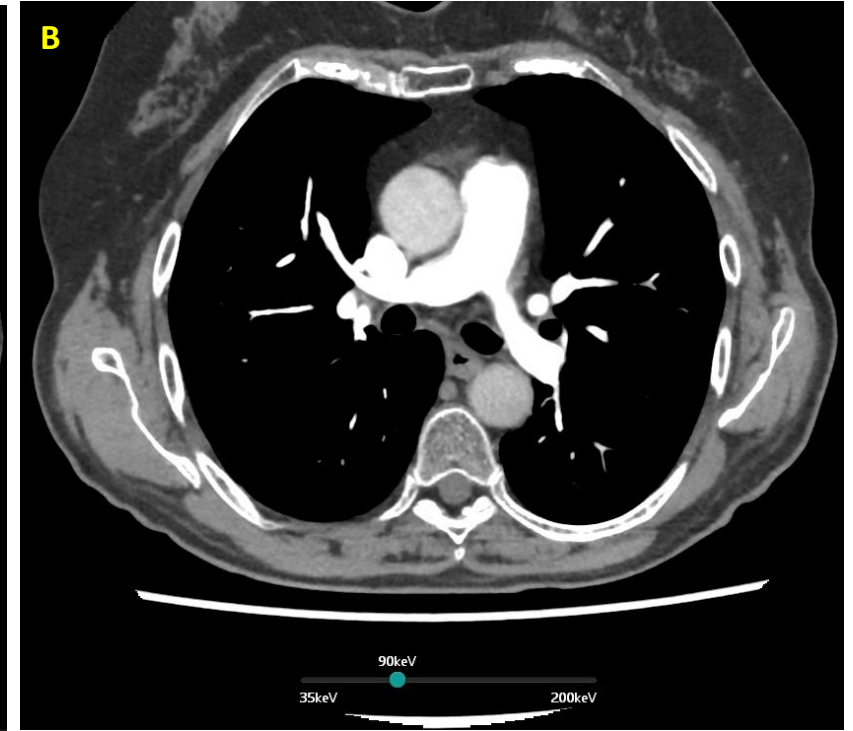
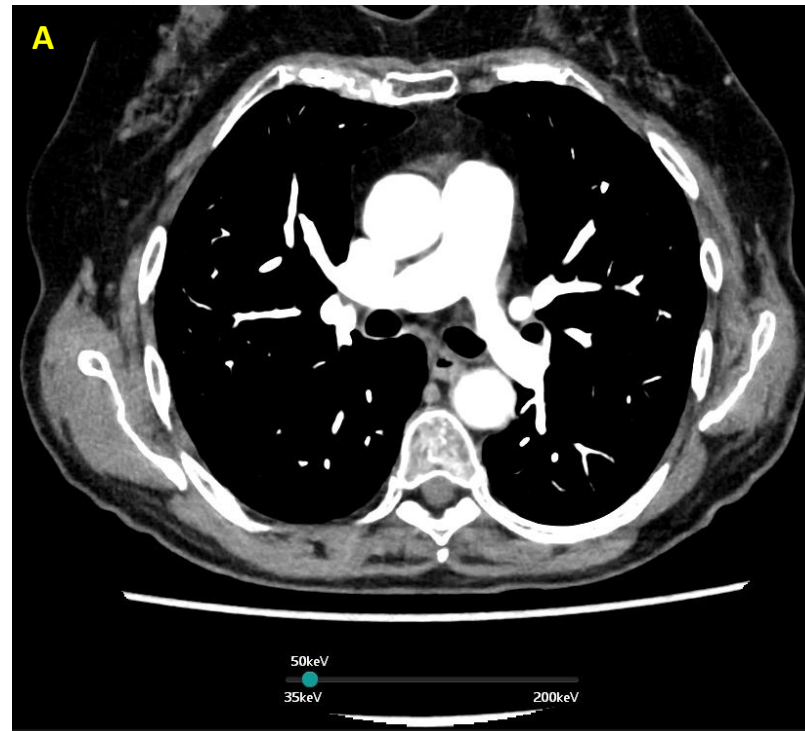
 El mapa de yodo no mide flujo sanguíneo dinámico, sino concentración estática de contraste en el momento de adquisición.

K-edge del yodo

El yodo presenta un K-edge en aproximadamente 33 keV.

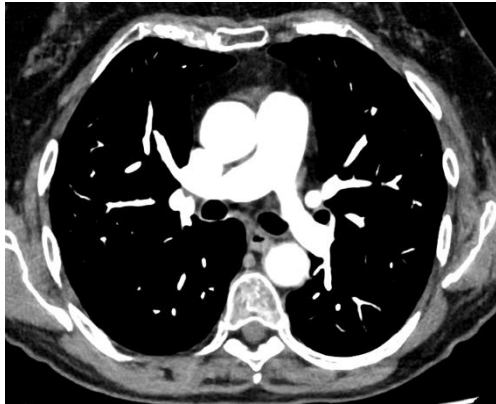
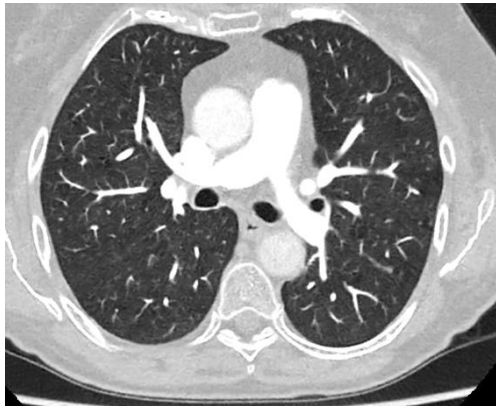
Esto implica que:

- ✓ Cerca de ese nivel energético, su atenuación aumenta bruscamente.
- ✓ Las VMI reconstruidas a 40–70 keV maximizan el realce vascular.
- ✓ Se mejora la detección de trombos o áreas hipoperfundidas.

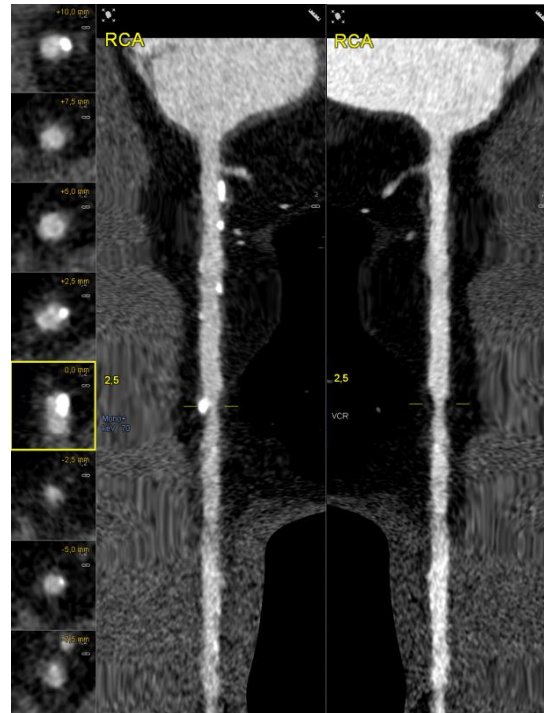


Atenuación dependiente de energía. Imágenes de Virtual monoenergetic imaging (VMI) reconstruidas a 50 (A) y 90 keV (B). Se observa un mayor realce de contraste en arteria pulmonar a baja energía.

Reconstrucciones principales:

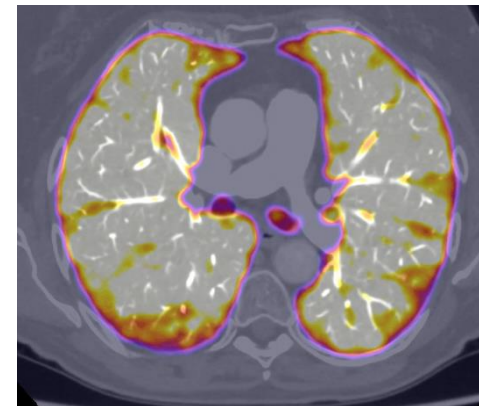


Virtual Monoenergetic Imaging (VMI)
Optimización
contraste/artefacto



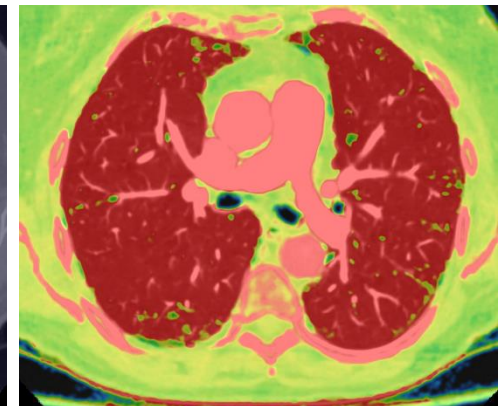
Virtual non Calcium (VNCa)
Eliminación del calcio

Mapas de yodo
Distribución vascular



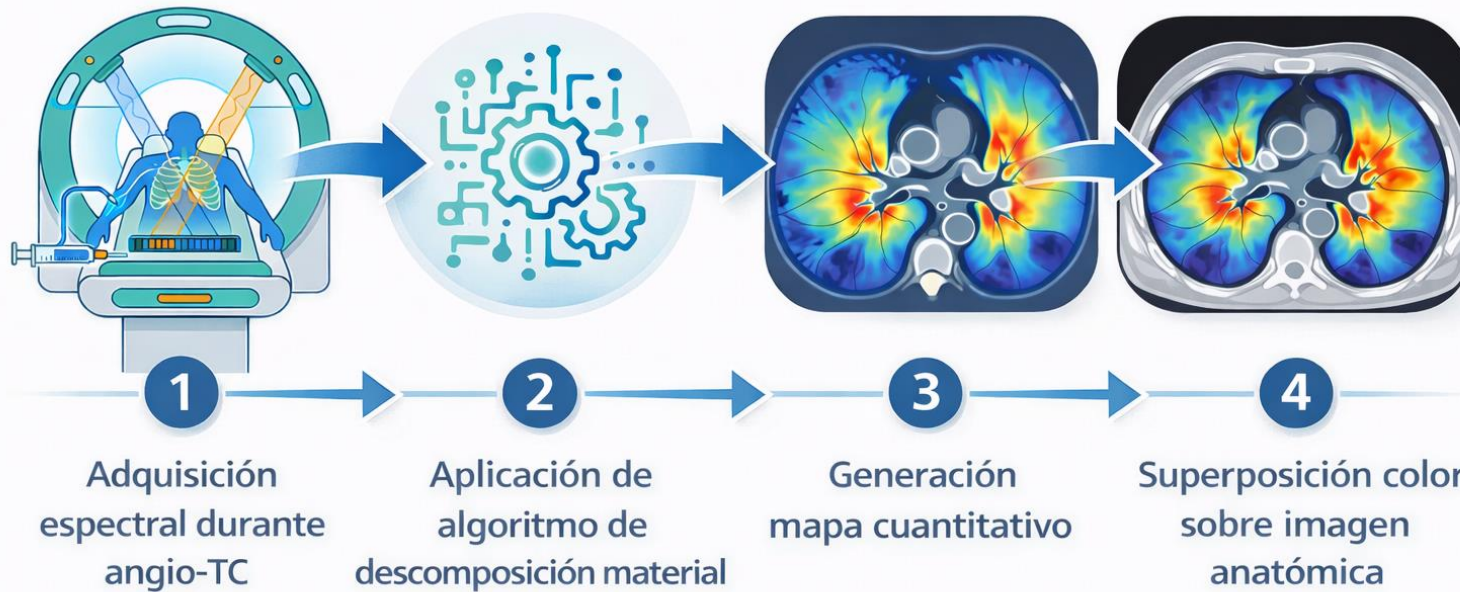
Perfusion Blood Volume (PBV)
Representación relativa de
perfusión

Nº atómico efectivo (Z-eff)
Caracterización tisular



Virtual non contrast (VNC)
Reducción de fase sin
contraste

Generación del mapa de yodo



Consideraciones prácticas:

- El valor absoluto depende del fabricante.
- Preferible usar métricas relativas.
- Importante normalizar con ROI en sangre.

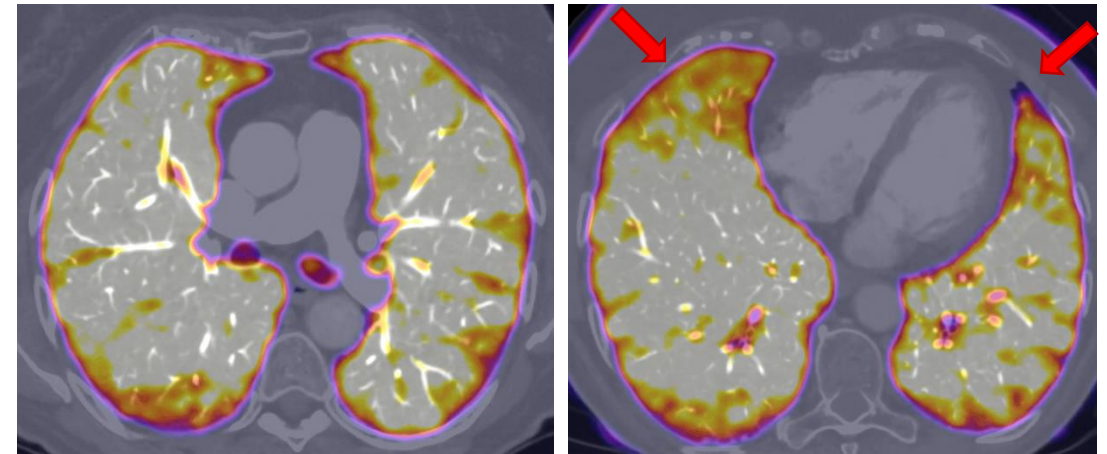
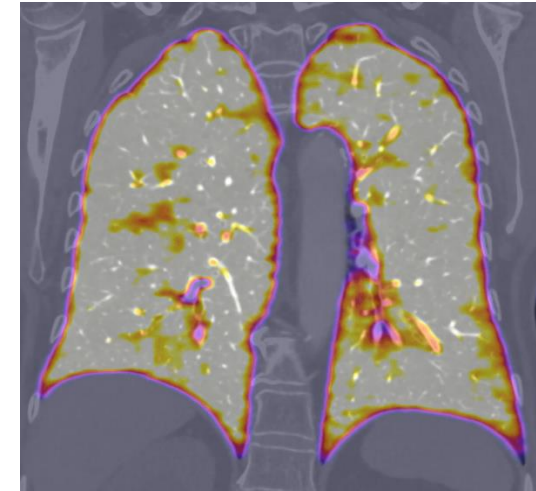
2. SEMIOLOGÍA DE PATRONES DE PERFUSIÓN

Perfusión pulmonar normal

En condiciones normales, los mapas de yodo muestran **distribución homogénea del volumen sanguíneo pulmonar (PBV)**.

Características:

- Distribución relativamente uniforme en ambos pulmones
- Mayor contenido de yodo en porciones declives o dependientes.
- Correspondencia con la anatomía vascular pulmonar
- Ausencia de defectos segmentarios definidos



Mapas de yodo normales en cortes axial y coronal, con gradiente anteroposterior (mayor perfusión en regiones posteriores).

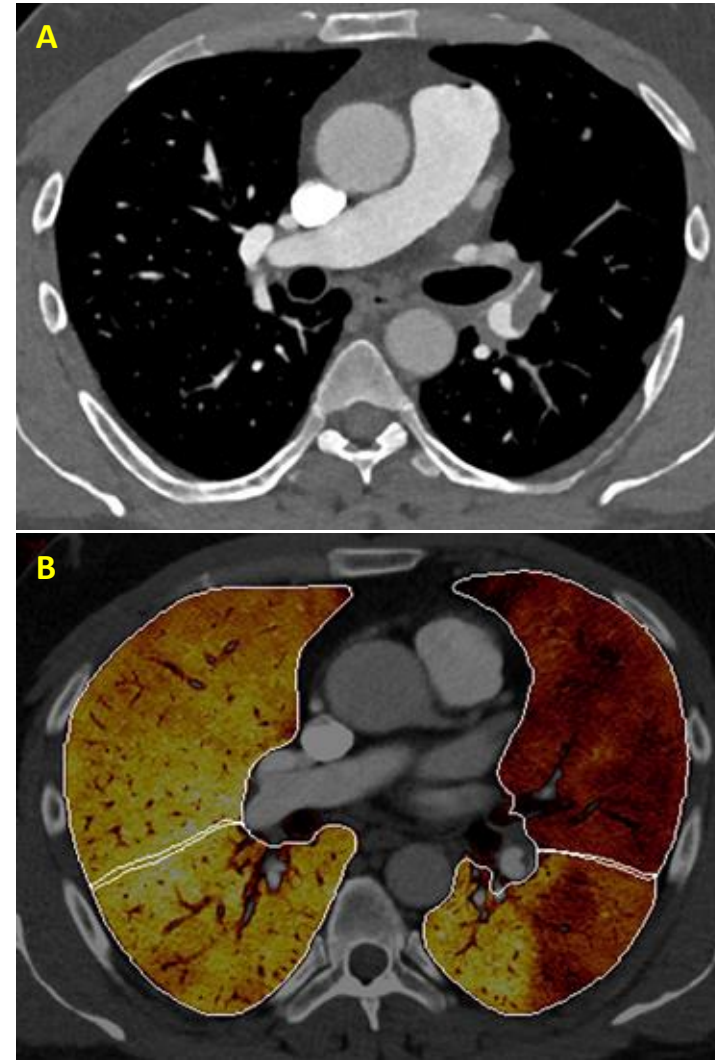
A) Defectos segmentario / lobar en cuña

Los defectos perfusionales se visualizan como **áreas focales de baja concentración de yodo**.

Características :

- Distribución **segmentaria** o **subsegmentaria**
- Morfología **periférica** o **triangular**
- Correspondencia con la distribución vascular pulmonar
- Delimitación relativamente nítida respecto al parénquima adyacente

La correlación con la anatomía arterial pulmonar es fundamental para su interpretación.



Defecto de repleción en arteria interlobar con extensión a ramas distales (A) que asocia defecto de perfusión en cuña correspondiente en lóbulo inferior y s. basal del lóbulo superior (B).

Imágenes cedidas por el Dr. Aubanell

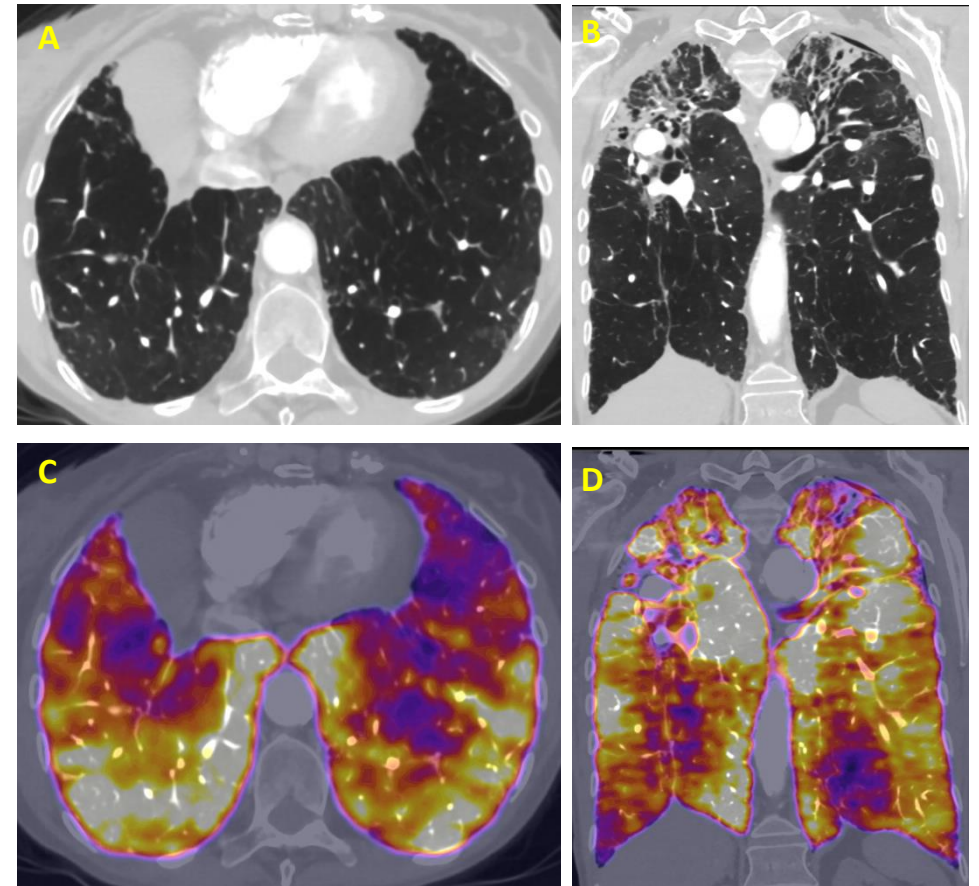
B) Defectos parcheados subsegmentarios múltiples

Áreas múltiples e irregulares de hipoperfusión con aspecto heterogéneo o en mosaico.

Puede observarse en embolia distal, enfermedad tromboembólica crónica o alteraciones microvasculares.

- Evaluar simetría
- Correlacionar con vasos segmentarios
- Descartar enfisema en ventana pulmonar

No todo patrón en mosaico implica embolia aguda.



Áreas de patrón en mosaico basales y zonas de fibrosis apicales en TC convencional (A y B) que asocia áreas de hipoperfusión parcheadas heterogéneas e irregulares asociadas en ambas localizaciones (C y D).

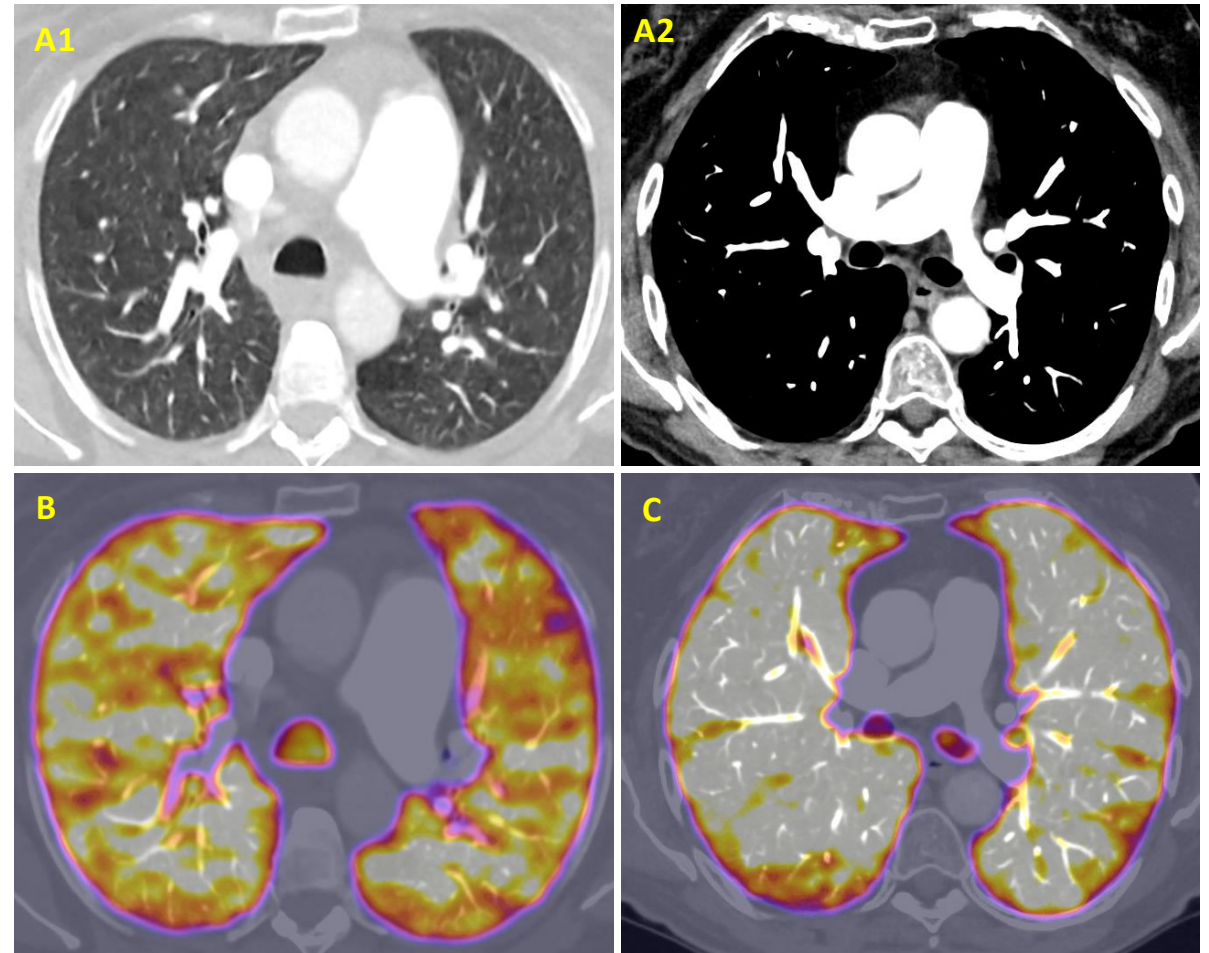
C) Reducción difusa global

Descenso homogéneo bilateral del yodo sin defectos segmentarios definidos.
Sugiere alteración hemodinámica global más que obstrucción focal.

Frecuente en:

- Hipertensión pulmonar (HTP)
- Bajo gasto cardíaco
- Vasculopatía difusa

La correlación clínica es esencial.



Patrón en mosaico en TC ventana pulmón (A1) así como tronco de arteria pulmonar en rango de HTP (A2). Hipoperfusión subsegmentaria parcheada en mapas de yodo (B) asociada. Mapa de yodo normal (C).

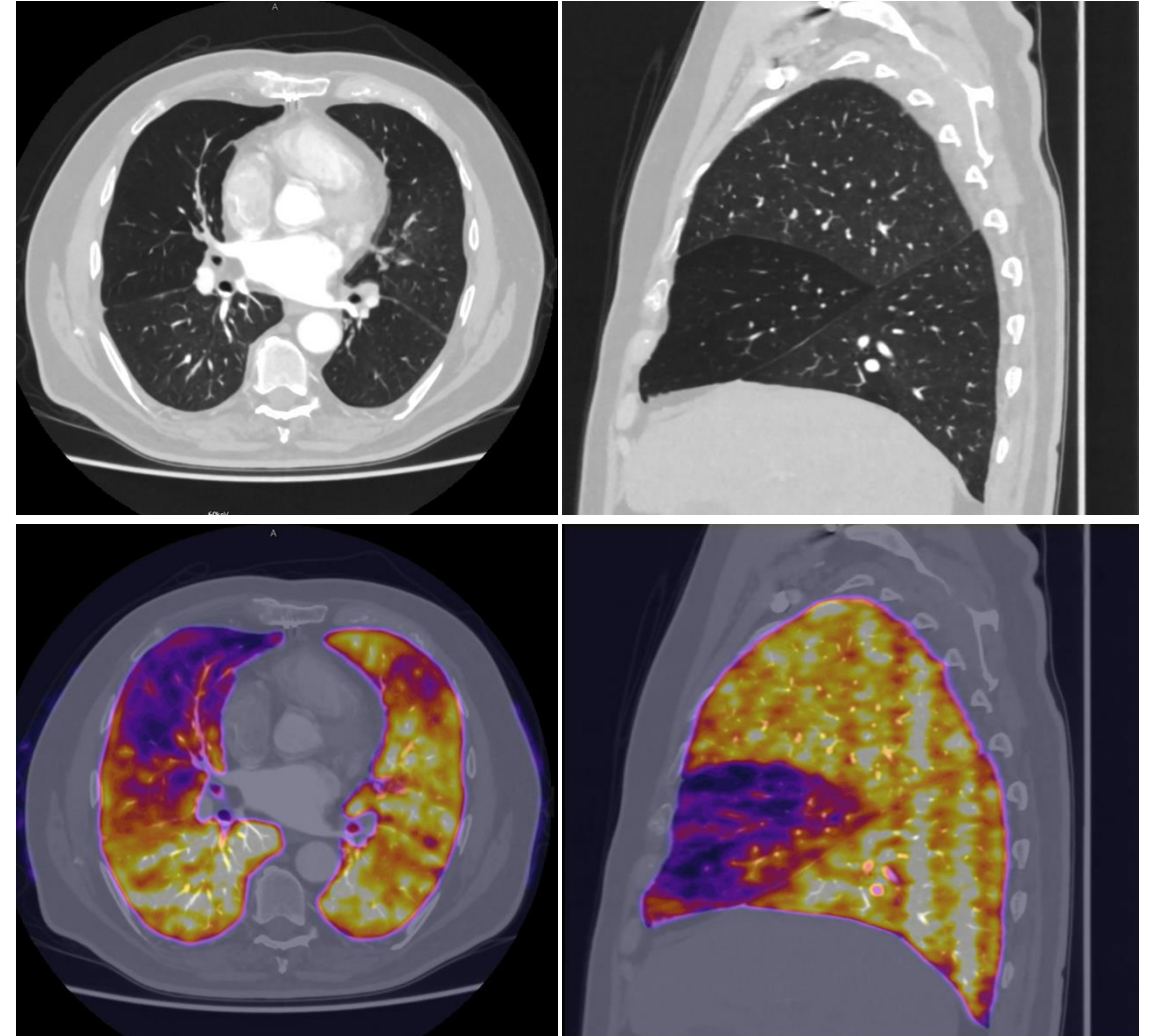
D) Redistribución/hipoperfusión compensatoria

Contraste marcado entre zonas hipoperfundidas e hiperperfundidas adyacentes.

Refleja mecanismo hemodinámico compensador secundario a obstrucción regional.

La hiperperfusión relativa no debe interpretarse como patología primaria.

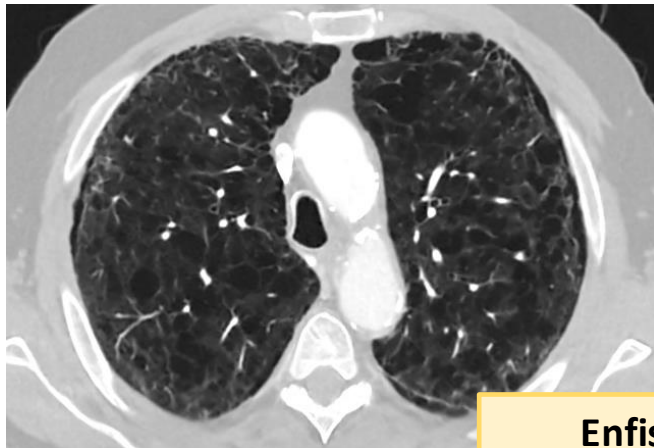
TC torácico con reconstrucción en el mapa de yodo que muestra extensas áreas de hipoperfusión coincidentes con áreas de hipoatenuación parenquimatosa sin defectos luminales arteriales. Estos hallazgos sugieren afectación parenquimatosa a nivel de la microvascularización y de la funcionalidad de la vía aérea, valorar posible síndrome de Swyer-James-Macleod. Se observan además, artefactos lineales periféricos.



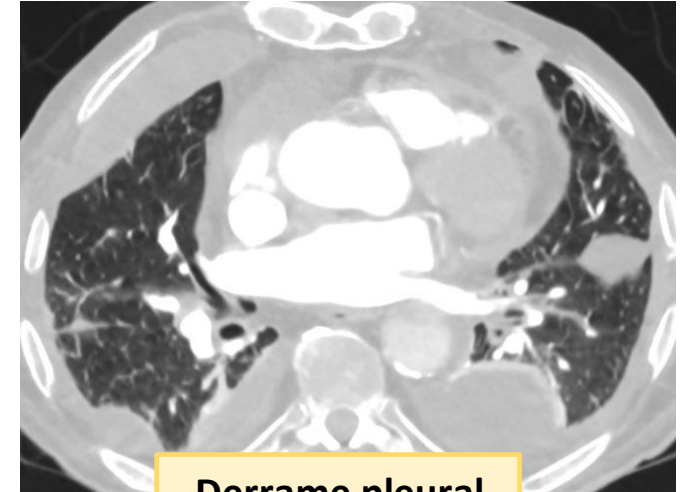
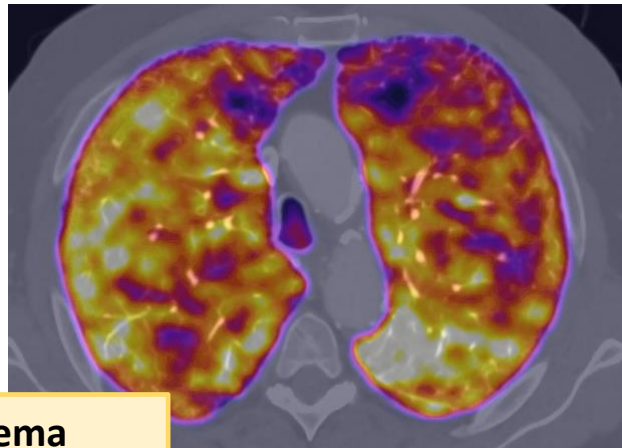
E) Defectos no TEP (pseudodefectos por exclusión/umbral)

En los mapas de yodo, el algoritmo segmenta el parénquima pulmonar y excluye áreas que superan determinados umbrales de densidad. Cuando el espacio alveolar está ocupado o sustituido, la zona puede aparecer sin color, simulando hipoperfusión.

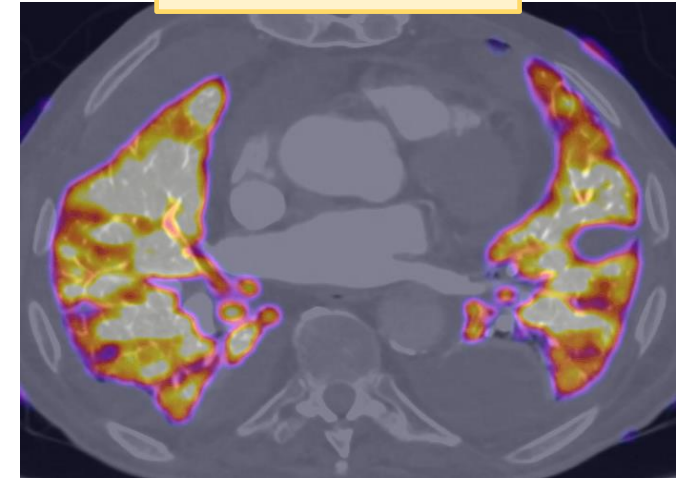
El defecto coincide con la lesión estructural visible y no sigue un territorio arterial segmentario.



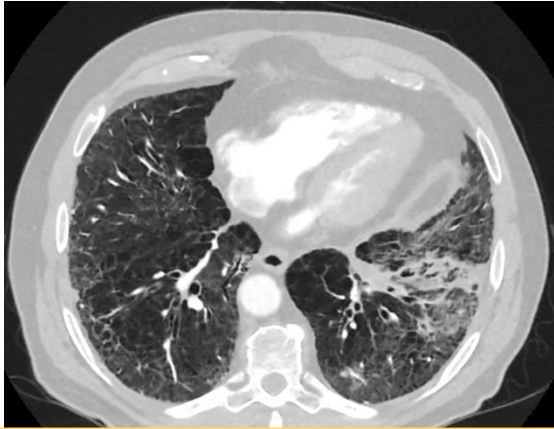
Enfisema



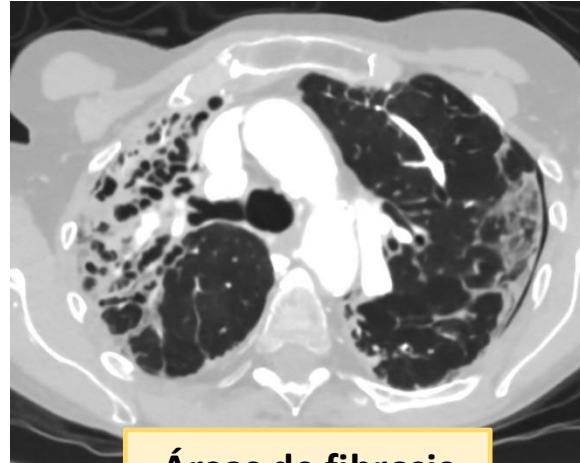
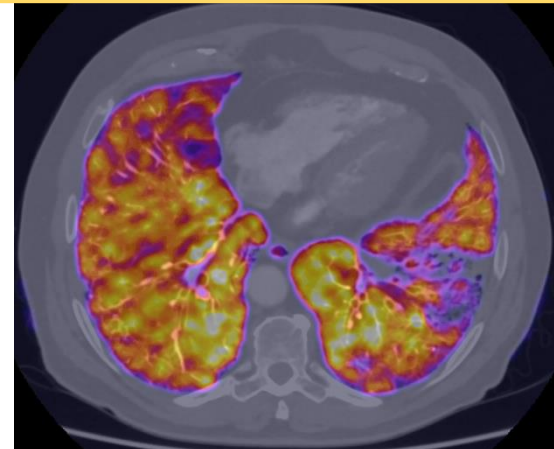
Derrame pleural



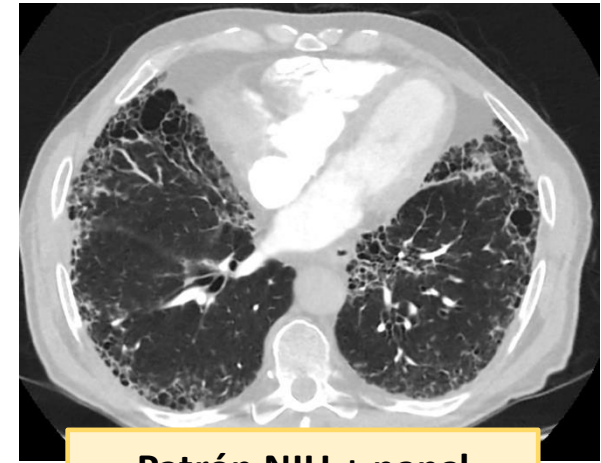
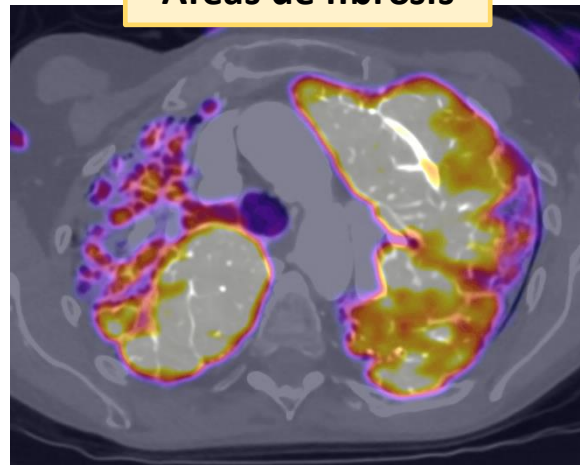
E) Defectos no TEP (pseudodefectos por exclusión/umbral)



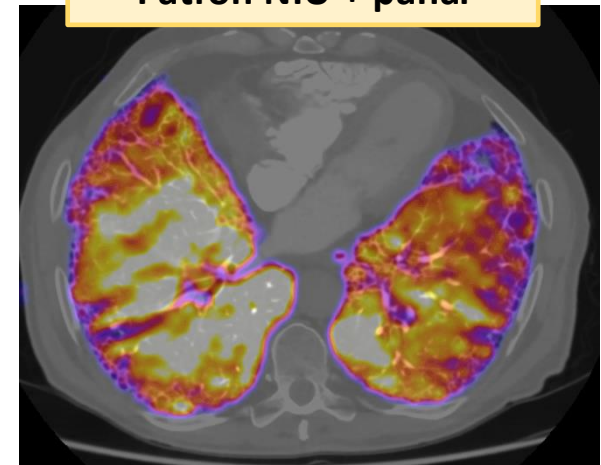
Consolidación + áreas de enfisema



Áreas de fibrosis



Patrón NIU + panal



F) Artefactos

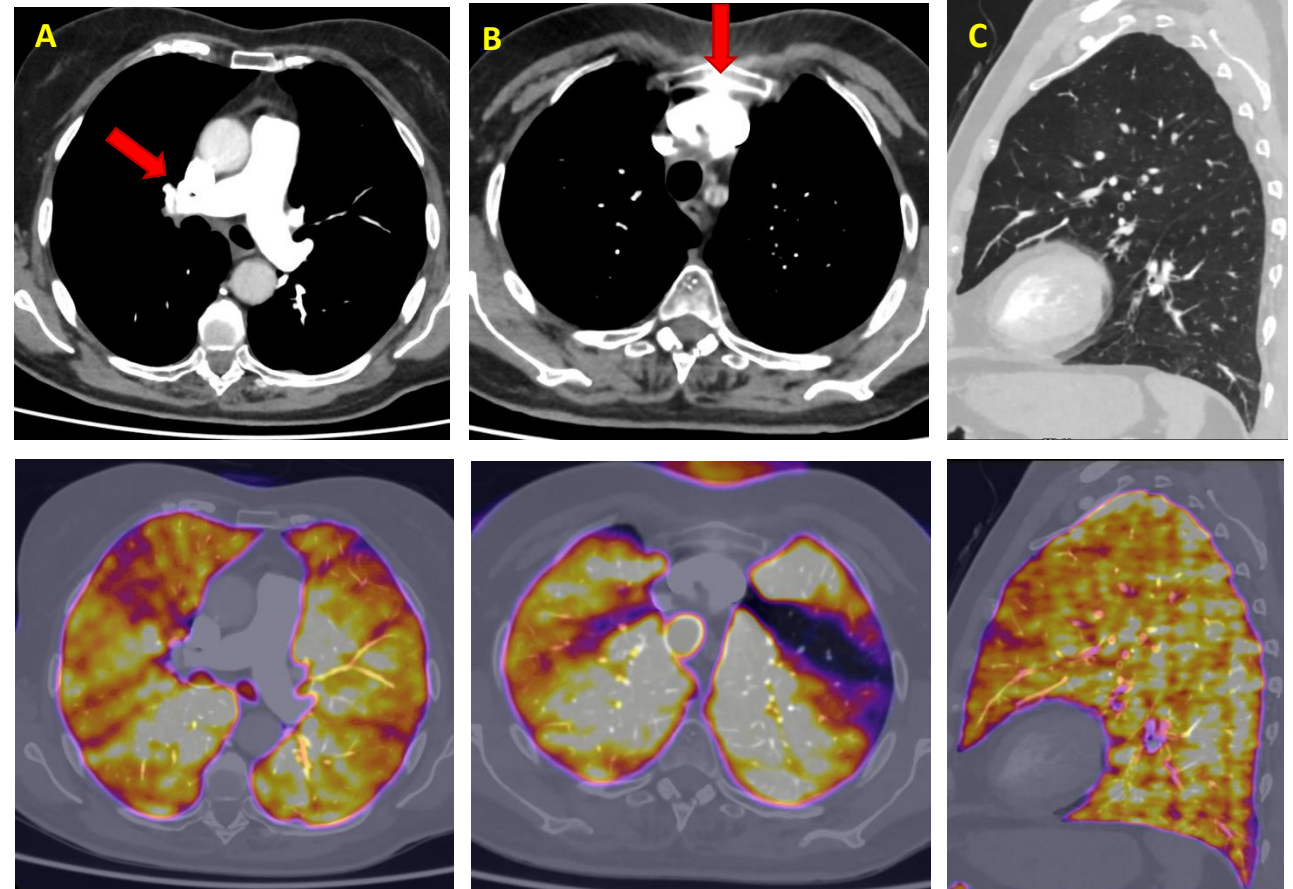
Algunas alteraciones se deben a fenómenos técnicos y no a patología real.

Causas frecuentes:

- Alta concentración de contraste en vena cava superior y en vena subclavia → bandas radiales adyacentes
- Bandas lineales periféricas
- Movimiento respiratorio o cardíaco
- Material metálico

Suelen presentar morfología lineal o geométrica, no respetan la anatomía segmentaria y pueden reducirse aumentando el kilovoltaje en la visualización de las imágenes VMI.

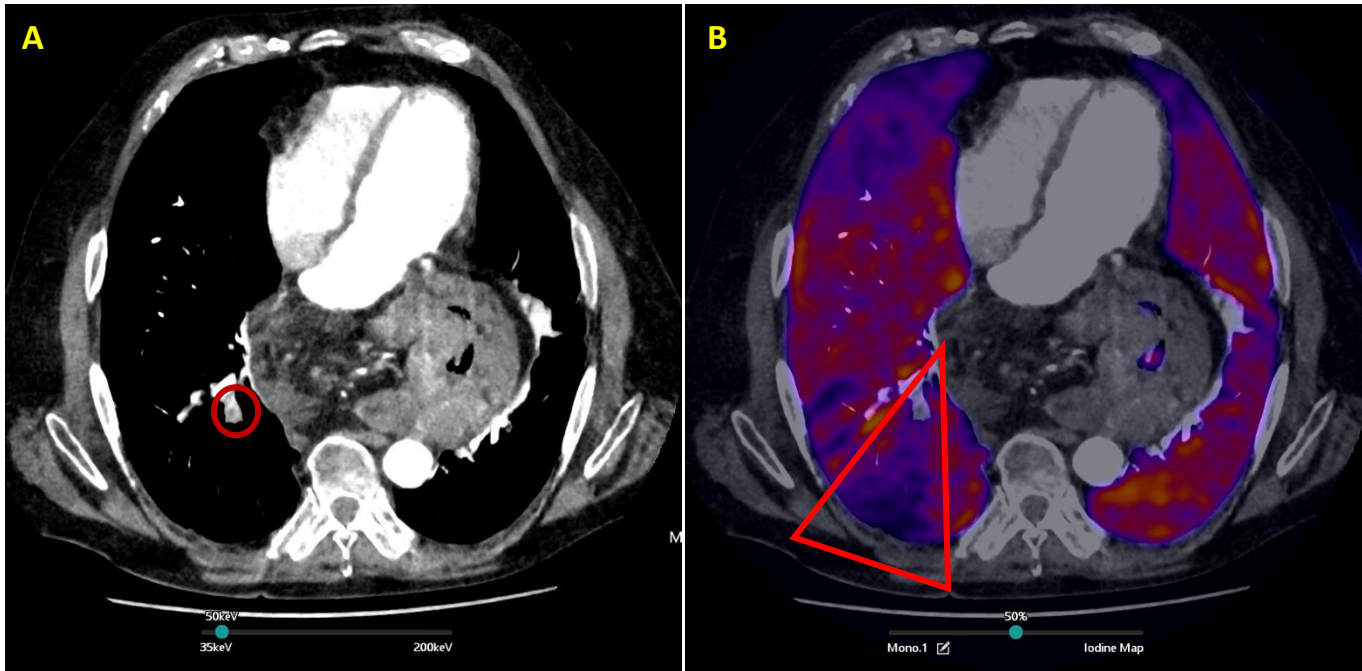
✓ Siempre confirmar en TC convencional.



Artefactos de contraste en vena cava superior (imagen A) y en vena subclavia izquierda (imagen B) y bandas lineales periféricas (imagen C).

3. APLICACIONES CLÍNICAS CLAVE

I. Embolia pulmonar aguda



Defecto de repleción en rama segmentaria para el LID (A) , con defecto segmentario de perfusión asociado (B).

La DECT permite integrar la evaluación **anatómica vascular** con la **perfusión pulmonar regional** mediante mapas de distribución de yodo.

Aplicaciones principales:

- Identificación de defectos segmentarios de perfusión asociados a obstrucción arterial
- Mejora de la detección de embolia distal o subsegmentaria
- Evaluación de la repercusión hemodinámica regional
- Mejora de la visualización del contraste intravascular mediante reconstrucciones de baja energía

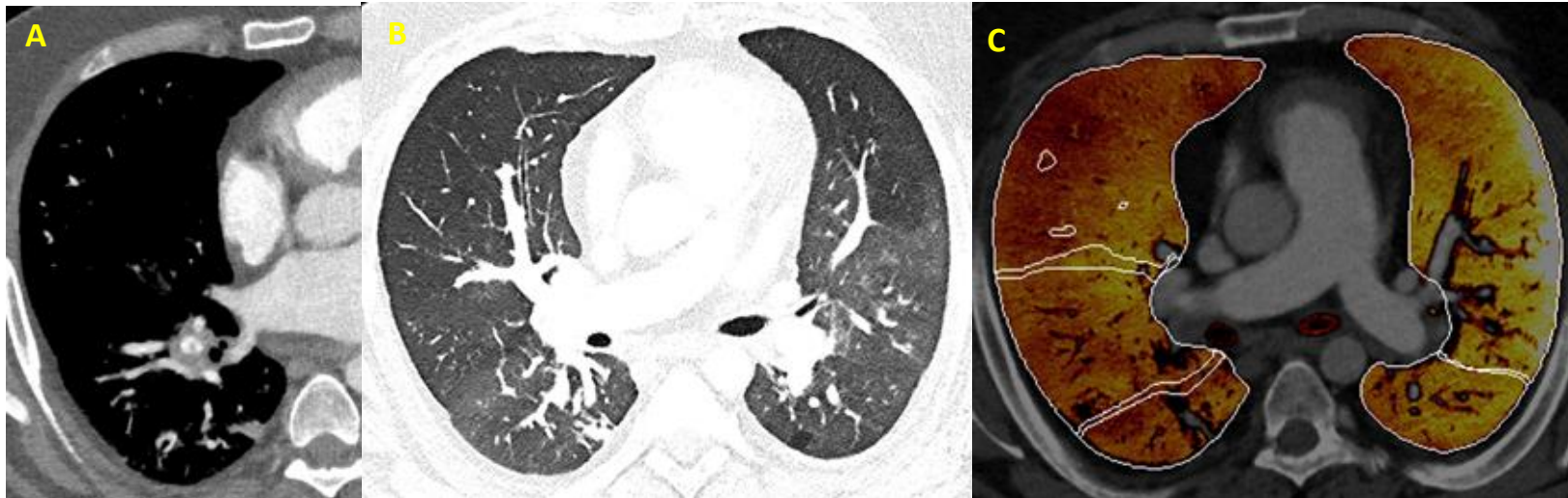
II. Tromboembolia crónica / Hipertensión pulmonar tromboembólica crónica (CTEPH)

La tromboembolia pulmonar crónica produce obstrucción vascular persistente y redistribución del flujo pulmonar, que puede conducir a hipertensión pulmonar.

La DECT permite evaluar simultáneamente angiografía pulmonar y perfusión regional mediante mapas de yodo o PBV.

En CTEPH, los mapas de perfusión suelen mostrar:

- defectos segmentarios persistentes
- patrón en mosaico perfusional
- redistribución compensatoria del flujo



Defecto de perfusión lineal en arteria segmentaria de la pirámide basal derecha (A). Asocia áreas de perfusión en mosaico (B) y zonas de hipoperfusión parcheada de predominio periférico (C).

Imágenes cedidas por el Dr. Aubanell

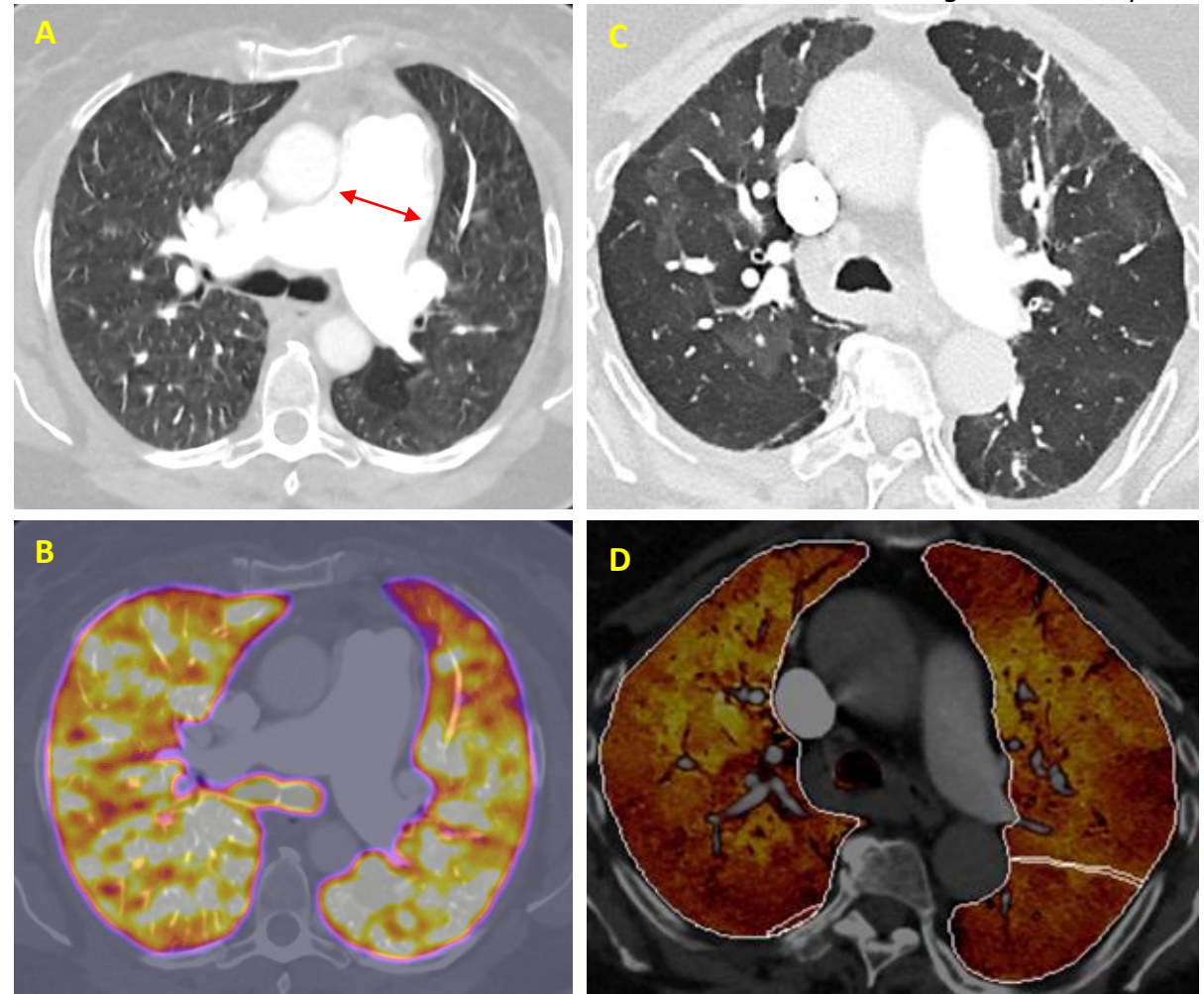
III. Hipertensión pulmonar

Los mapas de yodo permiten evaluar alteraciones del **volumen sanguíneo pulmonar (PBV)** asociadas a remodelado vascular.

Patrones descritos:

- Heterogeneidad perfusional regional
- Alteraciones microvasculares no visibles en CTA convencional

Estos hallazgos se interpretan en conjunto con los signos morfológicos de hipertensión pulmonar (dilatación arterial pulmonar, sobrecarga del ventrículo derecho).



Patrón de perfusión en mosaico difuso bilateral (A y B) que asocia heterogeneidad perfusional parcheada en el mapa de perfusión (C y D).

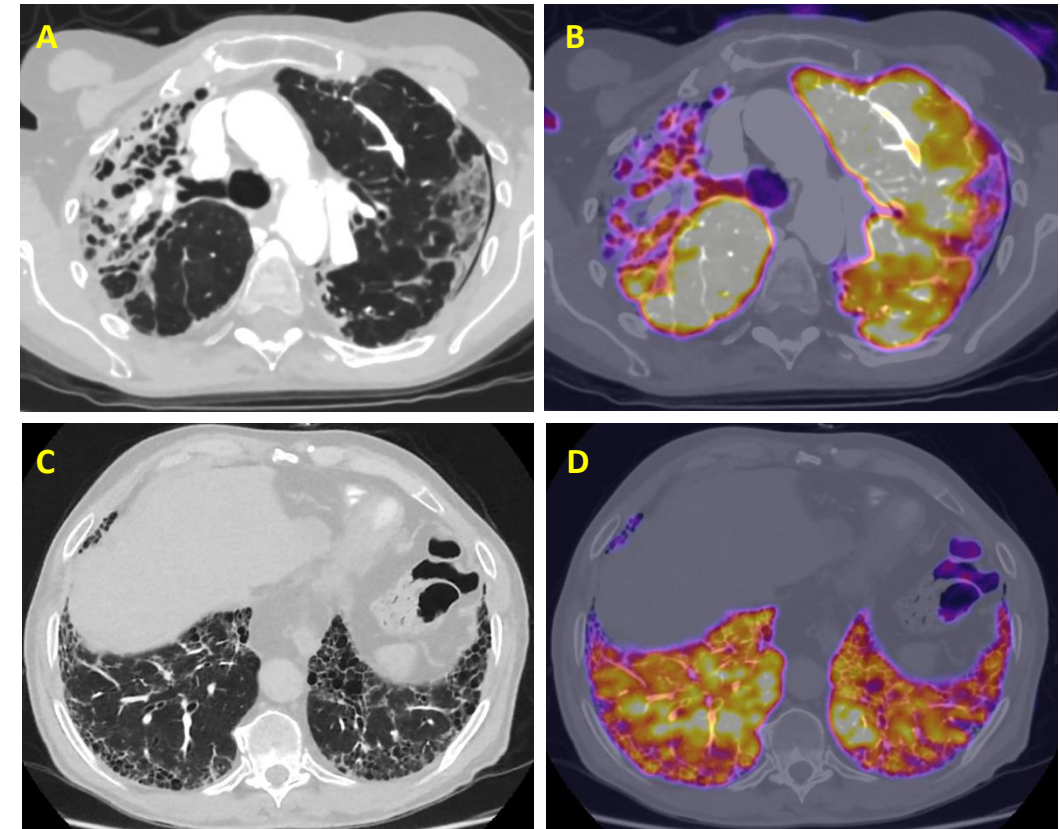
IV. Enfermedad intersticial y alteración vascular asociada

Las alteraciones estructurales del parénquima pulmonar pueden asociarse a **disminución regional del volumen sanguíneo pulmonar**.

En los mapas de yodo pueden observarse:

- Reducción perfusional en áreas fibróticas
- Heterogeneidad regional
- Redistribución vascular secundaria

La interpretación debe realizarse mediante **correlación con las imágenes estructurales** para diferenciar defectos perfusionales reales de cambios parenquimatosos.



Zonas de hipoperfusión coincidentes con zonas de afectación parenquimatosa intersticial-fibrótica en LSD y subpleural en LSI. (A,B)
Zonas hipoperfundidas en bases pulmonares que coinciden con áreas de atrapamiento aéreo y pérdida de trama vascular arterial. (C,D)

V. Oncología torácica: perfusión y diferenciación tumoral

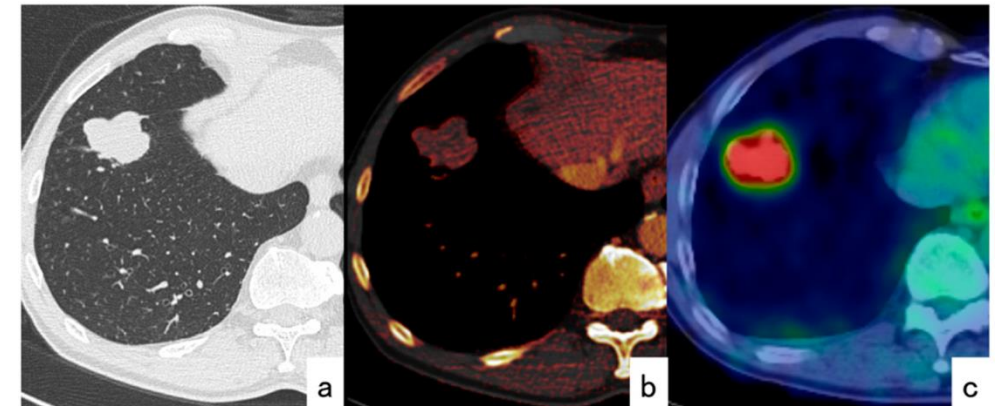
La DECT permite evaluar la vascularización tumoral mediante cuantificación de yodo.

Aplicaciones descritas:

- Caracterización tumoral: la concentración de yodo se relaciona con el grado de diferenciación (Iwano et al.)
- Asociación con biomarcadores moleculares:
 - EGFR (Zhang et al.)
 - VEGF (Li et al.)
- Evaluación de la heterogeneidad tumoral
- Potencial papel en estratificación pronóstica

✓ Aplicaciones en desarrollo con potencial utilidad clínica.

Iwano et al., Br J Radiol, 2015.



Varón de 65 años. (a) Adenocarcinoma pobremente diferenciado en LID. (b) Mapa de yodo que muestra un ROI intralesional de 20 UH. (C) PET/TC muestra la lesión con captación intensa de radiofármaco (SUVmax 10.1). Los tumores de alto grado tienden a tener menores concentraciones de yodo en comparación con los tumores de bajo grado.

5. LIMITACIONES Y SEGURIDAD

Limitaciones técnicas

- Dependencia de **adecuada opacificación vascular**.
- Sensibilidad a **artefactos de movimiento respiratorio o cardiaco**.
- **Ruido de imagen aumentado** en VMI de baja energía
- Variabilidad entre **plataformas y algoritmos de reconstrucción**.
- Posible aparición de **pseudodefectos perfusionales** (artefactos, enfermedad parenquimatosa, umbral de segmentación).

La interpretación de los mapas de yodo debe realizarse siempre **correlacionando con la angio-TC convencional**.

Seguridad y consideraciones clínicas

- La **dosis de radiación es comparable** a la TC convencional cuando se utilizan protocolos optimizados.
- Requiere **administración de contraste yodado intravenoso** teniendo en cuenta los riesgos inherentes al contraste.
- La cuantificación perfusional puede verse influida por **factores técnicos y hemodinámicos**.

La DECT debe considerarse una **herramienta complementaria**, integrada en la evaluación clínica y radiológica global.

Conclusiones

- La **tomografía computarizada de doble energía (DECT)** permite integrar información **anatómica y funcional** mediante la evaluación de la distribución pulmonar de yodo.
 - Los **mapas de perfusión** facilitan la identificación de alteraciones hemodinámicas regionales y complementan la interpretación de la angio-TC convencional.
 - Su aplicación clínica resulta especialmente útil en:
 - Tromboembolia pulmonar aguda y crónica
 - Hipertensión pulmonar y enfermedad vascular pulmonar
 - Las herramientas de **cuantificación perfusional y análisis espectral** amplían el potencial diagnóstico y pronóstico de la técnica.
 - A pesar de sus limitaciones técnicas, la DECT representa una **herramienta que combina morfología e imagen funcional pulmonar**, con creciente integración en la práctica clínica.
-

Referencias

1. Alizadeh LS, Shabestari AA, Akhlaghpour S. Dual-energy CT in cardiothoracic imaging. *Diagnostics (Basel)*. 2023;13:1813.
 2. Ozawa Y, Ohno Y, Yui M, et al. Dual-energy CT for pulmonary functional imaging. *Diagnostics (Basel)*. 2023;13:1693.
 3. Hong YJ, Shim J, Lee SM, et al. Dual-energy CT for pulmonary embolism: current and evolving clinical applications. *Korean J Radiol*. 2021;22:1555-1568.
 4. D'Angelo T, Cicero G, Mazziotti S, et al. Virtual monoenergetic imaging in dual-energy CT: technique and clinical applications. *Br J Radiol*. 2019;92:20180546.
 5. Bustos Fiore A, et al. Defectos de perfusión en mapa de yodo: causas y semiología. *Radiología*. 2018;60:489-498.
 6. Iwano S, Ito S, Tsuchiya K, et al. Lung cancer differentiation with enhanced dual-energy CT: evaluation of iodine concentration. *Br J Radiol*. 2015;88:20150224.
 7. Zhang G, Cao Y, Zhang J, et al. Associations between dual-energy spectral CT measurements and EGFR mutation in lung adenocarcinoma. *J Cancer Res Clin Oncol*. 2021;147:1169-1178.
 8. Li Q, Li X, Li XY, et al. Spectral CT for evaluation of tumor angiogenesis in lung cancer using iodine concentration. *AJR Am J Roentgenol*. 2020;215:595-602.
 9. Deng L, et al. Whole-lesion iodine map histogram analysis for lung cancer characterization. *Diagn Interv Imaging*. 2024;105:167-175.
 10. Piri R, et al. Artificial intelligence-assisted quantification of lung perfusion using dual-energy CT. *Diagnostics (Basel)*. 2025;15:312.
-