

EL ROL DE LA TC DUAL EN LA PATOLOGÍA MUSCULOESQUELÉTICA

Ernesto Antonio Castañeda Vargas¹, Eva Merayo Yécora¹, Lucía Morán García¹, Cristian Hernández Crespo¹, Alejandra Vela Martín¹, Clara Rodrigo Pérez¹, Elena Núñez Miguel¹, Nuria Andrés García¹.

¹Hospital Clínico Universitario de Valladolid (HCUV), Valladolid

OBJETIVO DOCENTE

Exponer los fundamentos y aspectos técnicos de la Tomografía Computarizada de Doble Energía (TCDE), además de revisar sus principales aplicaciones establecidas; así como aquellas en desarrollo para patología músculo-esquelética.

REVISIÓN DEL TEMA

FUNDAMENTOS Y ASPECTOS TÉCNICOS

- La tomografía computarizada de doble energía (TCDE) emplea de forma simultánea haces de rayos X adquiridos a dos niveles distintos de energía, habitualmente con kilovoltajes pico (kVp) bajos (80–90 kVp) y altos (140–150 kVp). Esta adquisición dual permite analizar el comportamiento diferencial de los tejidos en función de la energía del haz incidente.
 - Las principales interacciones entre los fotones de rayos X y la materia son la dispersión de Compton (caracterizada por la desviación del fotón con pérdida parcial de energía) y el **efecto fotoeléctrico** (que implica la absorción completa del fotón con la consiguiente eyección de un fotoelectrón). La dispersión de Compton predomina en la mayoría de los rangos energéticos utilizados en TC; por el contrario, el efecto fotoeléctrico adquiere mayor relevancia a energías bajas. Este último fenómeno depende en mayor medida del número atómico del material y de la energía de enlace del electrón de la capa kappa (borde K).
-

FUNDAMENTOS Y ASPECTOS TÉCNICOS: Niveles de energía para representar mejor tejidos y estructuras

- Los elementos primarios del ser humano, como el oxígeno, hidrógeno, carbono y nitrógeno, tienen números atómicos bajos, por lo que muestran una atenuación relativamente similar en ambos niveles energéticos; en cambio, elementos como el yodo y el calcio tienen números atómicos altos, con mayor atenuación fotoeléctrica a energías más bajas. De esta manera, la TCDE puede procesar los datos de atenuación a diferentes niveles de energía y poder obtener una mejor diferenciación y separación de los materiales.
-

Material evaluado	Niveles de energía (keV) recomendados	Justificación clínica
Yodo (contraste)	40–60 keV	Máximo contraste, alta sensibilidad de tumores, vasos y hemorragias.
Urato monosódico	40–70 keV	Mejor visualización y diferenciación.
Tejidos blandos	60–70 keV	Balance entre contraste y ruido.
Hueso/calcio	100–120 keV	Reducción de artefactos, definición de placas ateroscleróticas y del espacio perivascular.
Reducción de artefactos metálicos	120–200 keV	Minimización de artefactos de endurecimiento de haz.

keV: kiloelectronvoltios

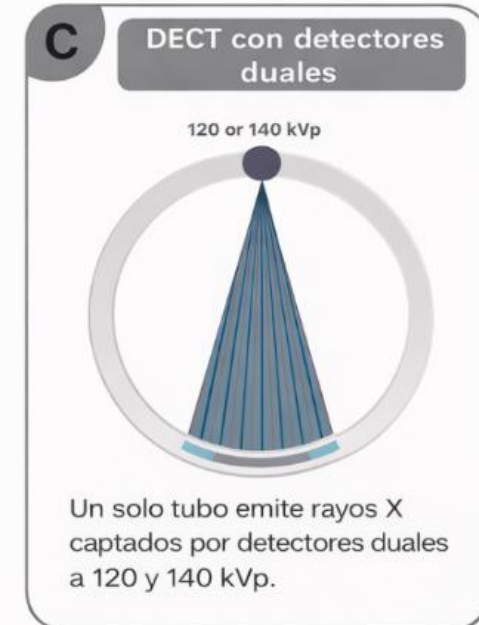
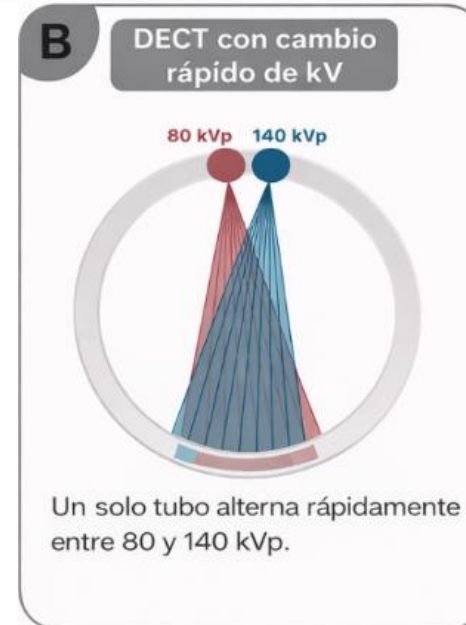
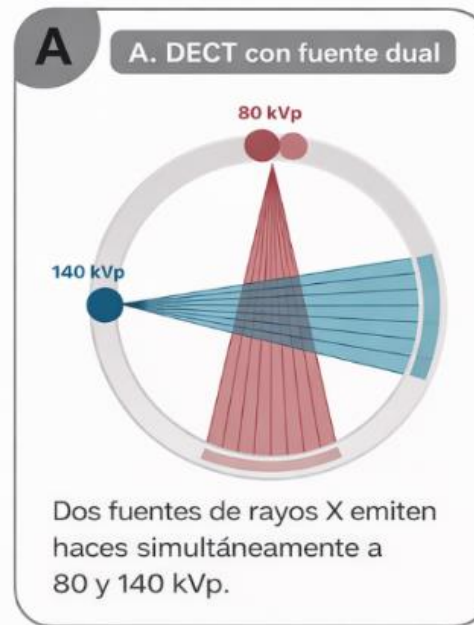
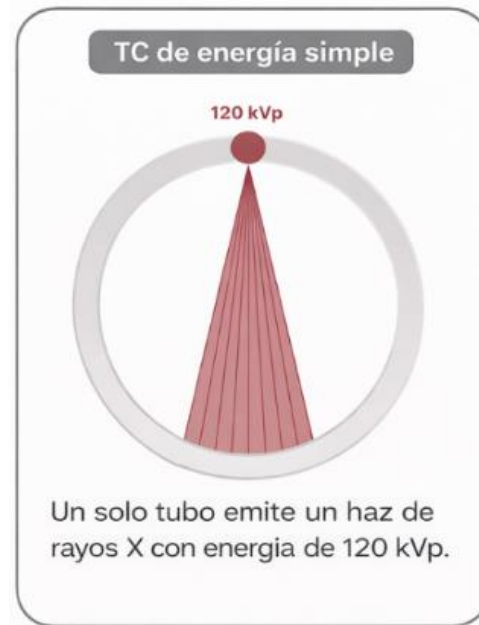
FUNDAMENTOS Y ASPECTOS TÉCNICOS:

Obtención de la imagen

- Existen diversas técnicas de adquisición de imágenes en tomografía computarizada de energía dual (TCDE), que pueden clasificarse según su principio de funcionamiento: basadas en la fuente de rayos X (fuente dual, conmutación rápida de kilovoltaje) o basadas en detectores (detectores de doble capa, de conteo de fotones). Todos estos sistemas permiten, además, operar en modo convencional de energía simple.
 - La principal diferencia es que la obtención de imagen basada en la fuente utiliza dos voltajes de tubo de rayos X para generar dos espectros de energía, mientras que la obtención basada en detectores emplea un detector de doble capa para separar los fotones de baja y alta energía a partir de un solo haz, sin cambiar el voltaje del tubo.
 - Los últimos avances han permitido preservar la calidad de imagen con dosis de radiación menores o iguales a la TC convencional.
-

FUNDAMENTOS Y ASPECTOS TÉCNICOS: Obtención de la imagen

Tipos de tomografía computarizada dual-energética (TCDE)



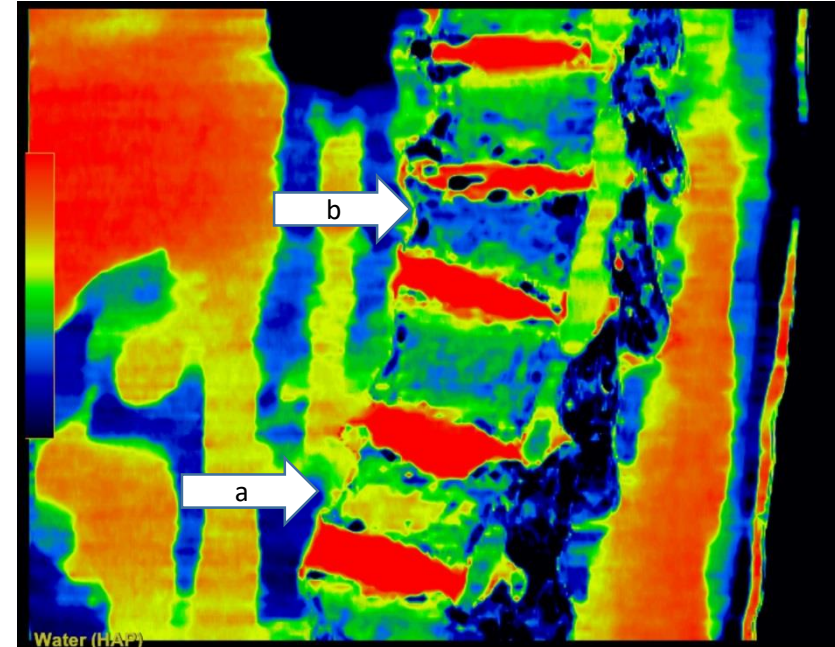
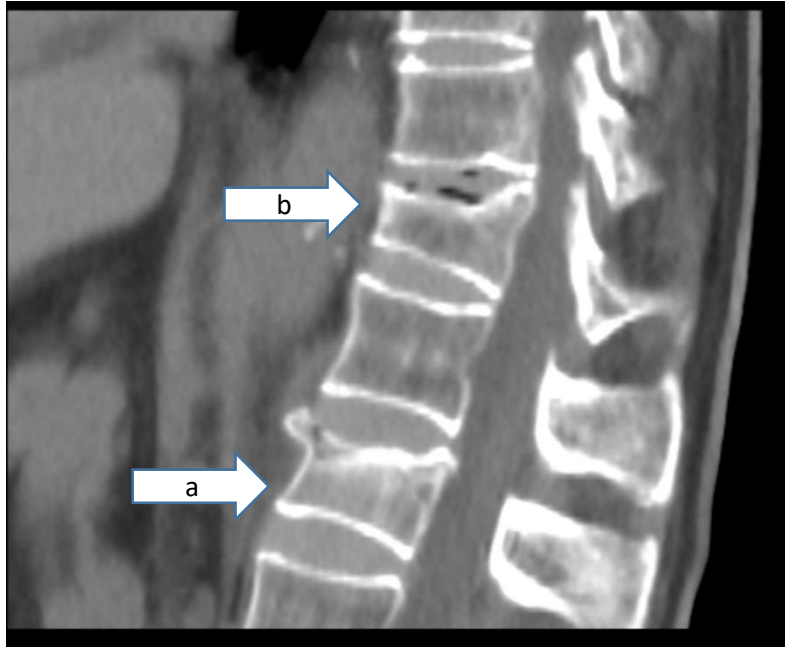
APLICACIONES DE LA TCDE EN LA PATOLOGÍA MÚSCULOESQUELÉTICA: **Edema óseo**

- Los traumatismos esqueléticos producen con frecuencia lesiones que comprometen tanto el hueso cortical como la médula ósea. Estas alteraciones pueden manifestarse como edema óseo medular (EOM), el cual constituye un hallazgo radiológico relevante y un marcador sensible de fracturas ocultas o de trazo sutil.
 - La TCDE, mediante técnicas avanzadas de postprocesamiento, permite generar reconstrucciones con sustracción virtual de calcio. Este procedimiento posibilita la detección del edema óseo medular (EOM) a través de la diferenciación de materiales basada en la atenuación específica a distintos niveles de energía de los rayos X, eliminando virtualmente la contribución de la matriz mineral ósea.
 - De este modo, la TCDE se configura como una alternativa diagnóstica útil frente a la resonancia magnética (RM), considerada el estándar de referencia para la detección del edema óseo. No obstante, la RM presenta limitaciones relevantes, como la incompatibilidad con determinados dispositivos médicos metálicos y la prolongada duración del estudio, lo que puede constituir una dificultad significativa en contextos clínicos urgentes.
-

APLICACIONES DE LA TCDE EN LA PATOLOGÍA MÚSCULOESQUELÉTICA: **Edema óseo**

- En determinados pacientes, la ausencia de discontinuidad cortical o de desplazamiento trabecular evidente limita el rendimiento diagnóstico de la radiografía convencional y de la tomografía computarizada (TC) estándar. En este contexto, la detección del EOM mediante la TCDE aumenta la sensibilidad para el diagnóstico de fracturas ocultas o sutiles. La relevancia clínica de detectar edema óseo radica en que permite confirmar la existencia de una fractura aguda, optimizar la toma de decisiones terapéuticas y reducir retrasos diagnósticos potencialmente asociados a complicaciones. Asimismo, la extensión y distribución del EOM pueden contribuir a diferenciar fracturas agudas de lesiones crónicas o subagudas, además de aportar información indirecta sobre la gravedad del traumatismo.
 - Las fracturas ocultas en las que esta técnica ha demostrado utilidad incluyen aquellas localizadas en muñeca (especialmente del escafoides), fémur proximal, columna vertebral, pelvis y huesos de las extremidades inferiores.
-

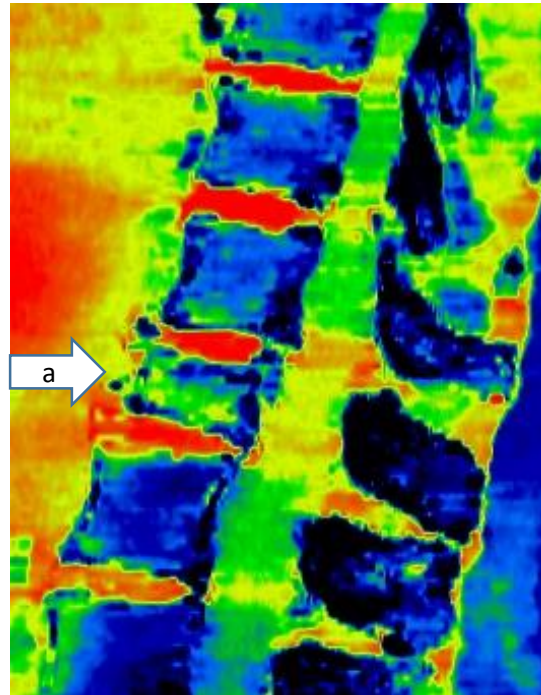
Edema óseo: fractura de vértebra



Fractura aplastamiento del cuerpo vertebral L2 de carácter **agudo**, con una pérdida de altura de aproximadamente el 45% y leve desplazamiento de fragmento posterosuperior (a).

Acuñamiento anterior de aspecto **crónico** del cuerpo vertebral T12 con una pérdida de altura de aproximadamente el 50%, sin desplazamiento del muro posterior (b).

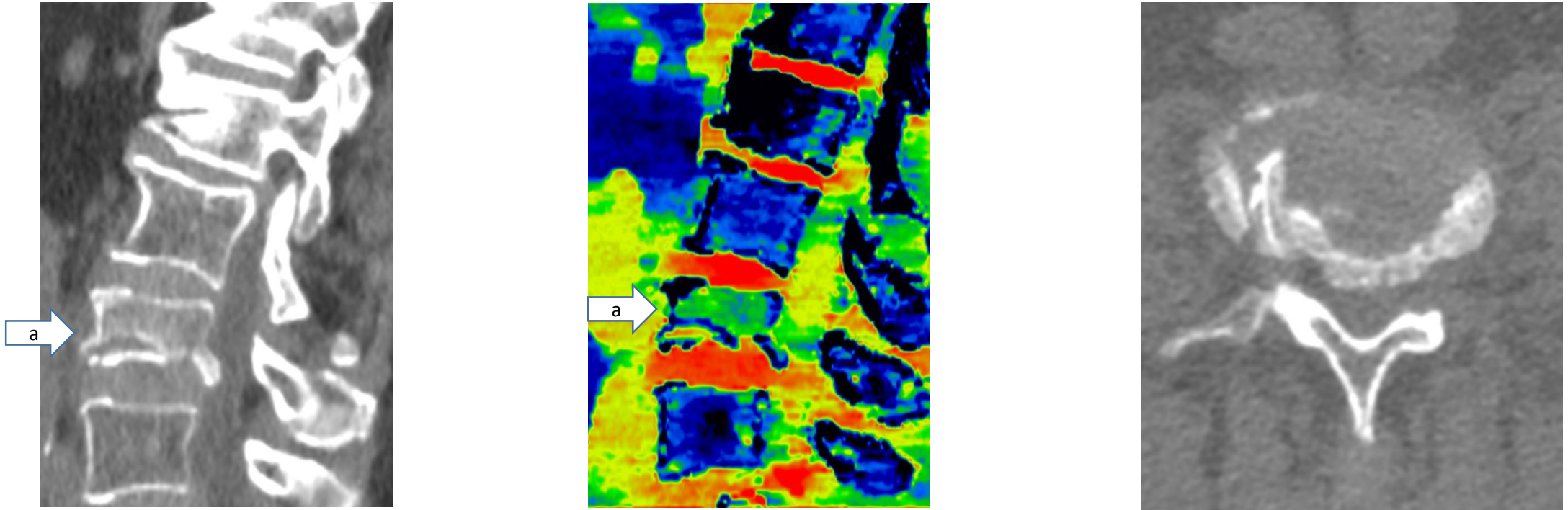
Edema óseo: fractura de vértebra



Se identifica fractura-aplastamiento del cuerpo vertebral de L1, con afectación del platillo superior y una pérdida de altura de aproximadamente el 40% (a).

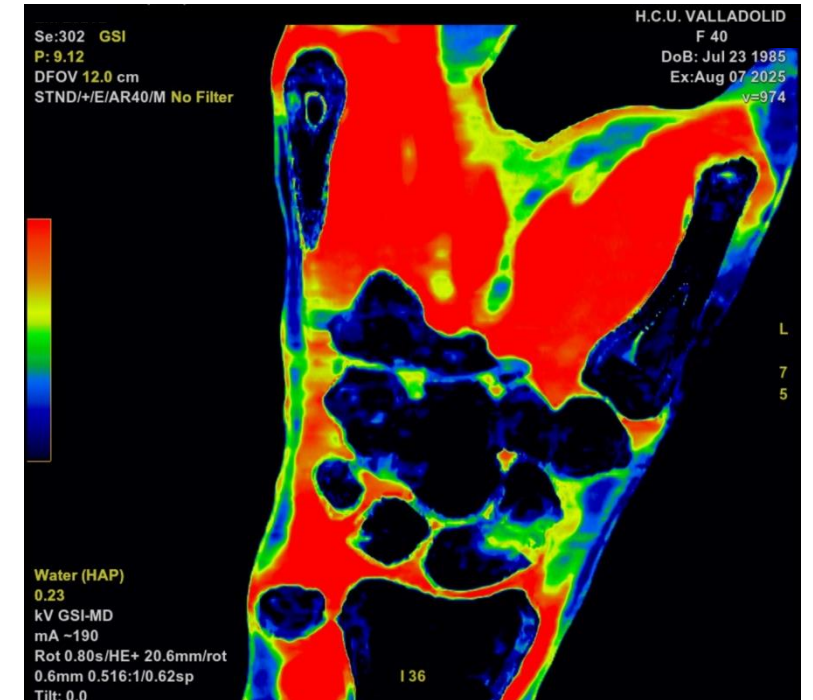
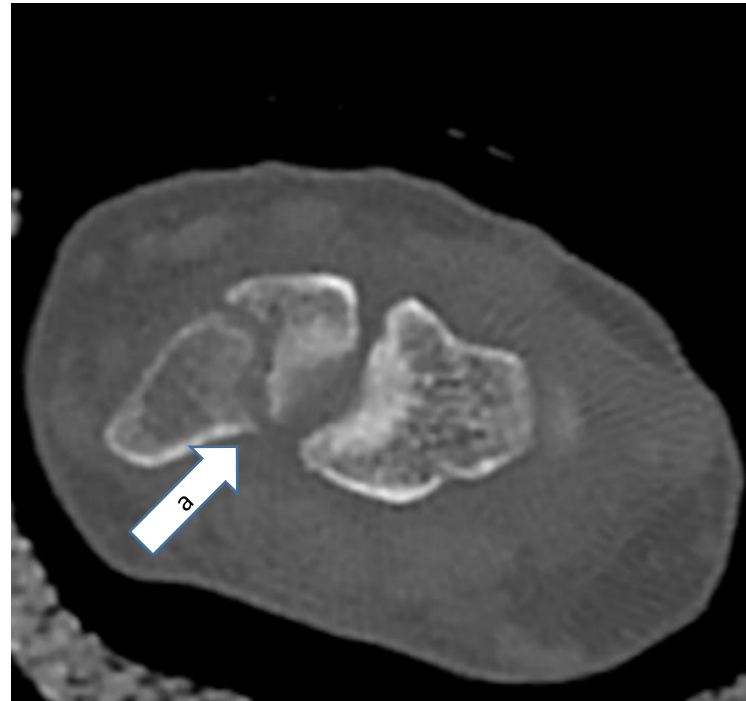
Se aprecia edema óseo tras el procesamiento de la imagen que sugiere fractura de carácter agudo.

Edema óseo: fractura de vértebra



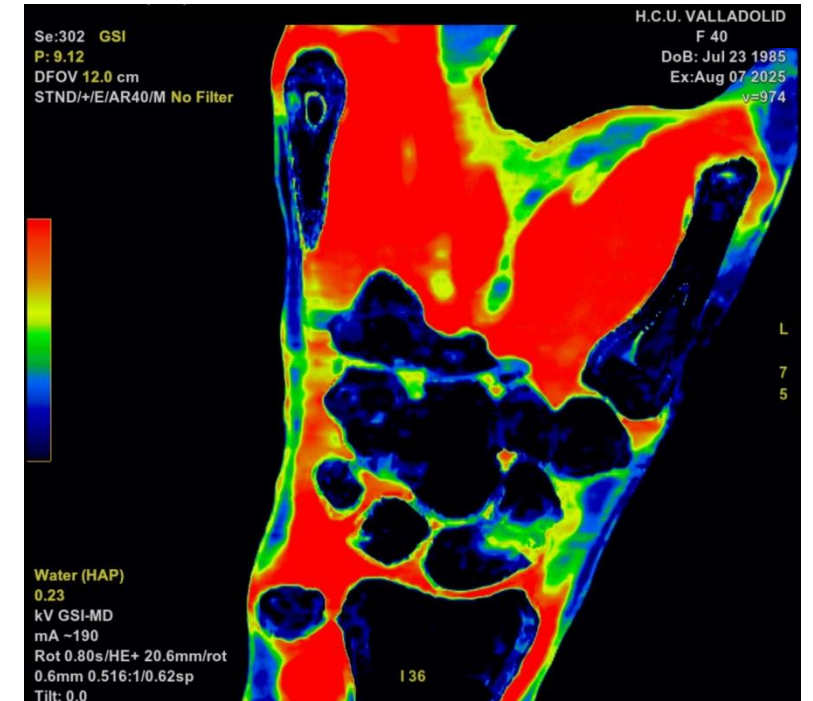
Se identifica fractura-aplastamiento del cuerpo vertebral de L4 (a), con afectación del platillo inferior. Se aprecia edema óseo tras el procesado de la imagen que sugiere fractura de carácter agudo. Se observa retropulsión de fragmento óseo de unos 6 mm hacia el canal medular, generando moderado compromiso de espacio

Edema óseo: fractura de escafoides



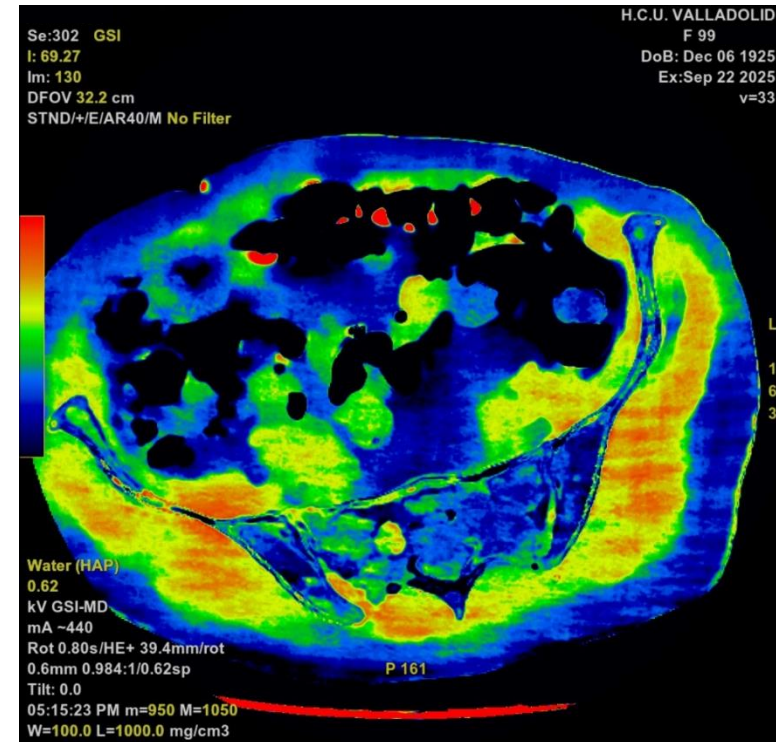
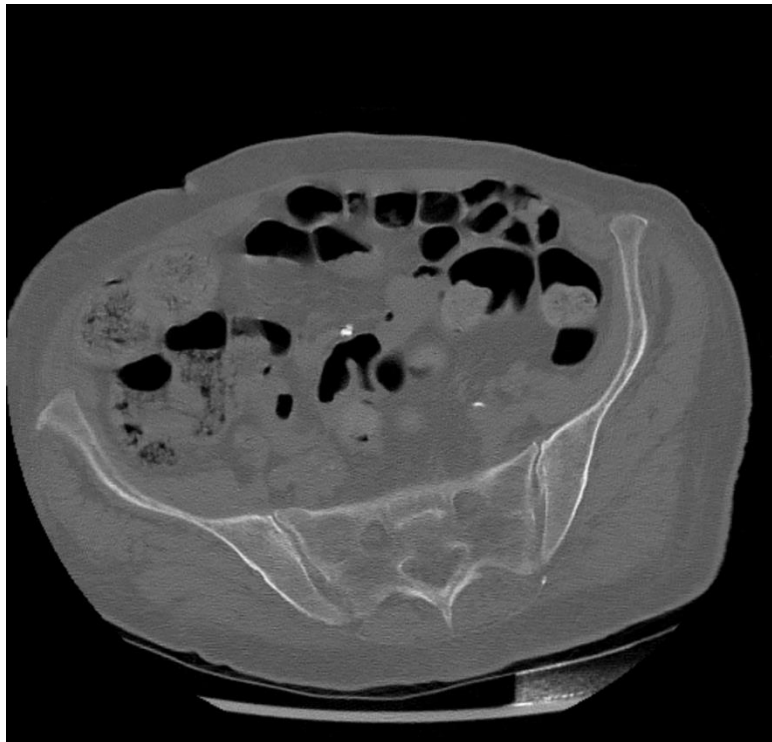
Se identifica trazo hipodenso lineal en la región de la cintura del escafoides interrumpiendo la cortical anterior y posterior sin desplazamiento significativo de fragmentos. La vertiente medial de la línea de fractura se divide en dos sin desplazamiento significativo (a). Edema óseo en el polo distal del escafoides, en probable relación con evolución subaguda (b).

Edema óseo: fractura de escafoides



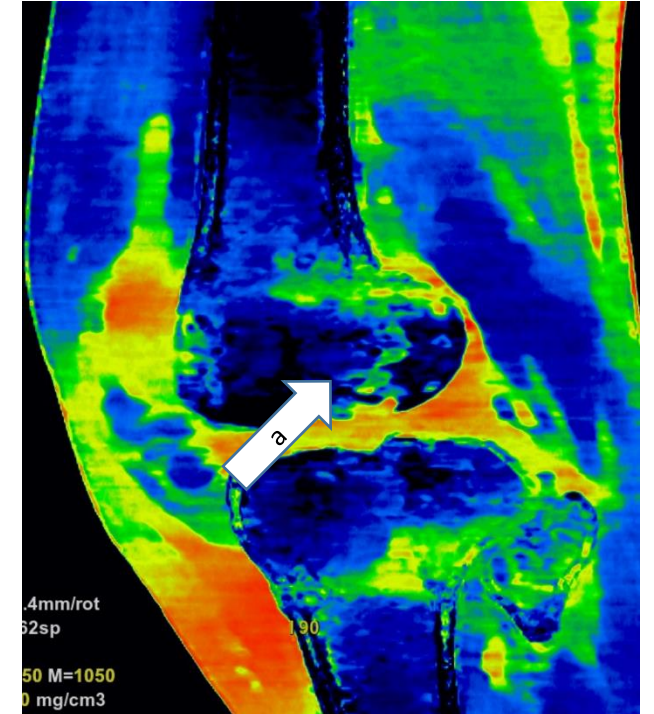
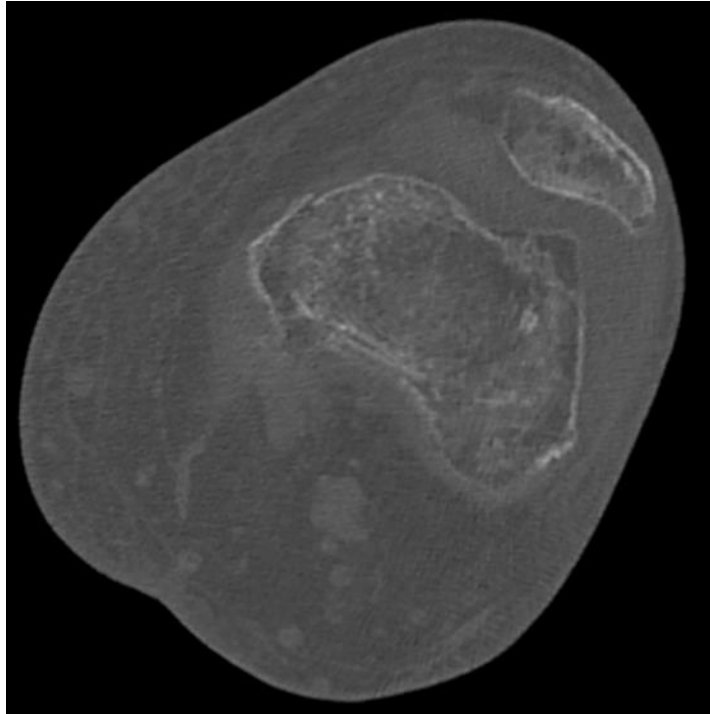
Se identifica trazo hipodenso lineal en la región de la cintura del escafoides interrumpiendo la cortical anterior y posterior sin desplazamiento significativo de fragmentos. La vertiente medial de la línea de fractura se divide en dos sin desplazamiento significativo (a). Edema óseo en el polo distal del escafoides, en probable relación con evolución subaguda (b).

Edema óseo: fractura de pelvis (sacro)



Marcados signos de edema óseo en el ala sacra derecha (a) que sugieren la existencia de línea de fractura aunque no se aprecie con claridad en el estudio morfológico.

Edema óseo: fractura de rodilla

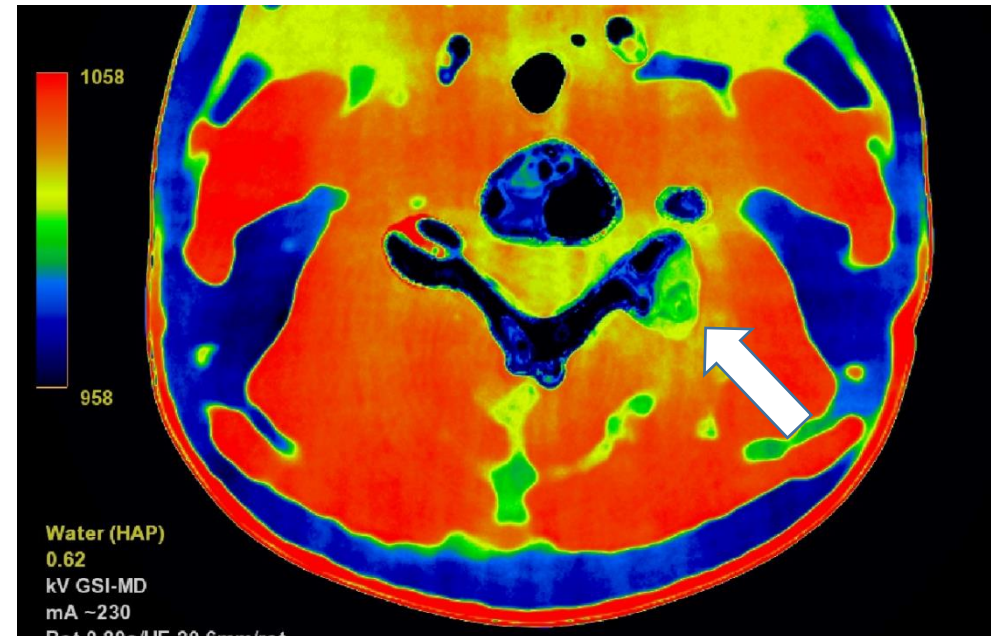
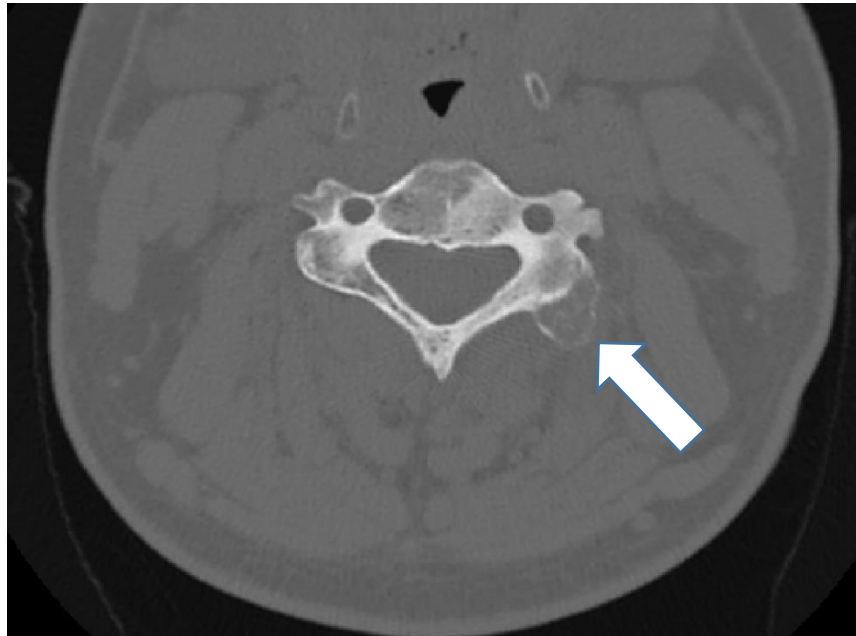


A nivel femoral se identifica una línea radioluciente supracondílea con signos de edema óseo en el postprocesado (a) sugestiva de línea de fractura. No se encuentra desplazada ni presenta afectación de la superficie articular

Edema óseo: Patología no traumática

- Los traumatismos musculoesqueléticos no son los únicos que causan EOM, cualquier patología inflamatoria, infecciosa o tumoral que afecte la médula ósea puede generar edema y detectarse mediante TCDE.
 - Las lesiones infiltrativas contienen mayor contenido de agua en el tumor y la médula ósea, en comparación con el hueso normal, debido a ello, se pueden utilizar los mapas de descomposición agua-HAP para distinguir las lesiones.
-

Edema óseo: Patología no traumática

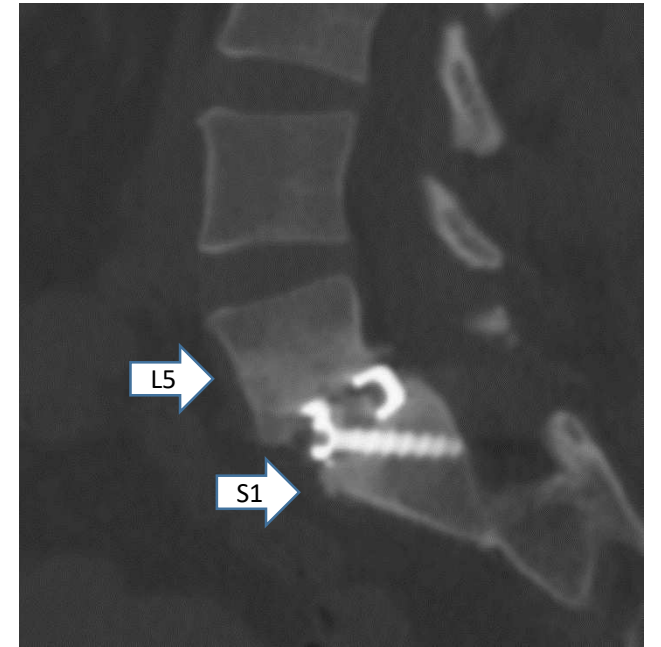
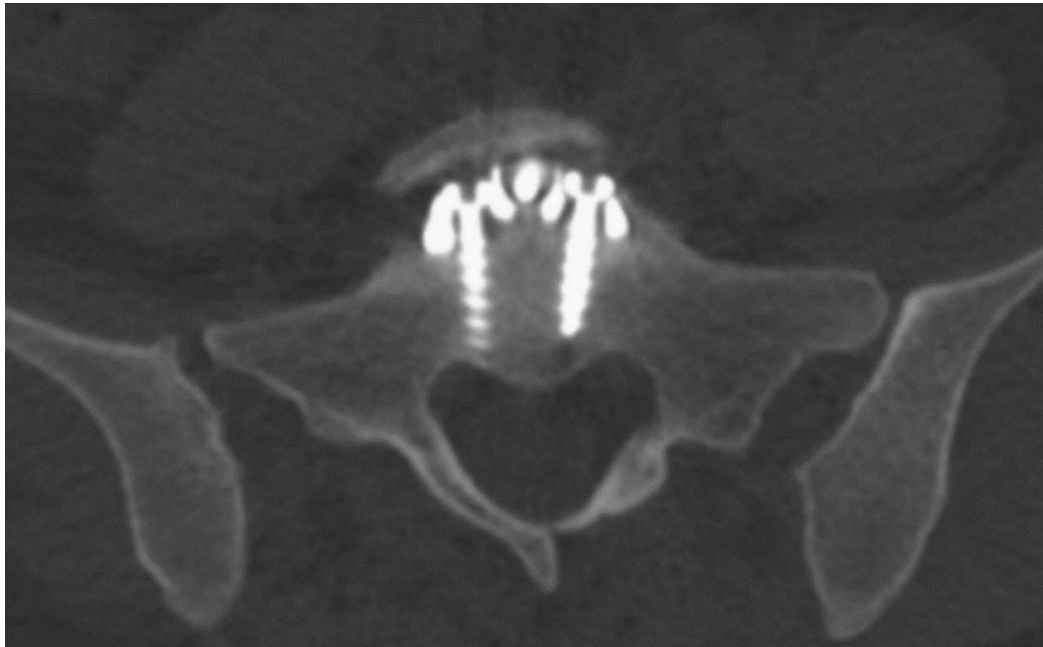


Imágenes en proyección axial, escala de grises y comparación de materiales (agua - hidroxipatita) arcoíris. Lesión lítica expansiva localizada en elementos posteriores del cuerpo cervical, esclerosis de hemicuerpo vertebral izquierdo adyacente a la lesión: osteoblastoma (flechas).

APLICACIONES DE LA TCDE EN LA PATOLOGÍA MÚSCULOESQUELÉTICA: Reducción de artefactos metálicos (MAR) y fracturas periprotésicas

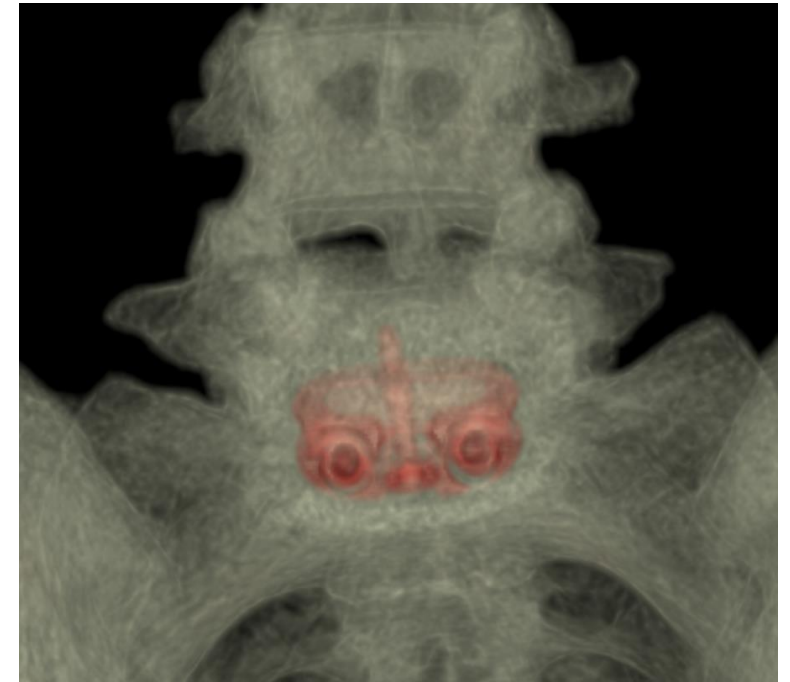
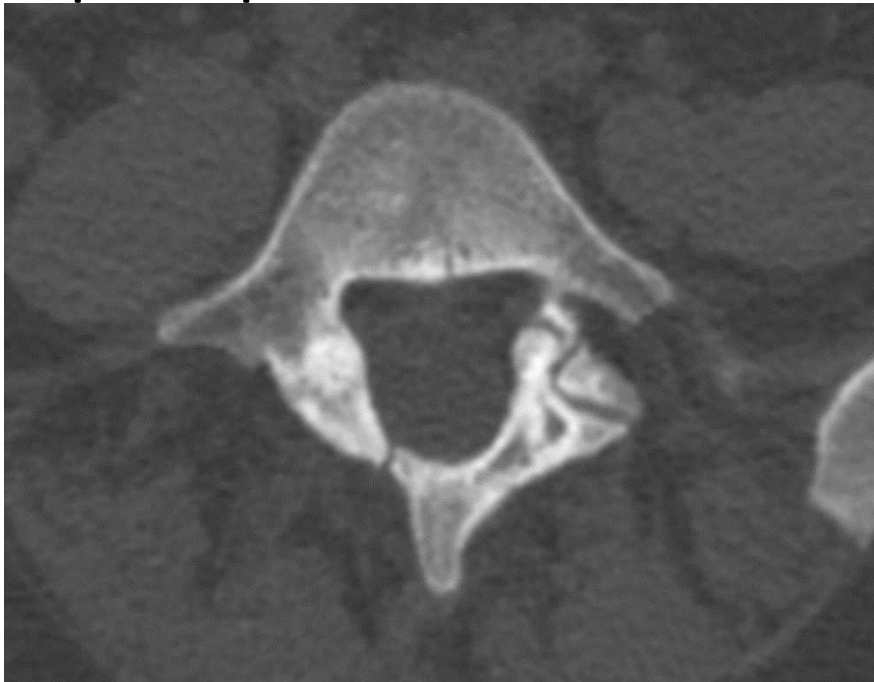
- El artefacto metálico producido por el endurecimiento del haz reduce la sensibilidad diagnóstica de la tomografía computarizada (TC) convencional. El uso de un haz de alta energía (140 kVp) atenúa los artefactos asociados al endurecimiento del haz metálico y a la escasez de fotones, mientras que la caracterización de los tejidos blandos se logra mediante el haz de baja energía (80 kVp), lo que permite generar imágenes virtualmente mono-energéticas de alta calidad a partir de los datos adquiridos.
 - Además, la combinación de la detección de EOM y los mapas de supresión de yodo facilita la identificación de fracturas peri-protésicas y de complicaciones postoperatorias.
-

Reducción de artefactos metálicos (MAR) y fracturas periprotésicas



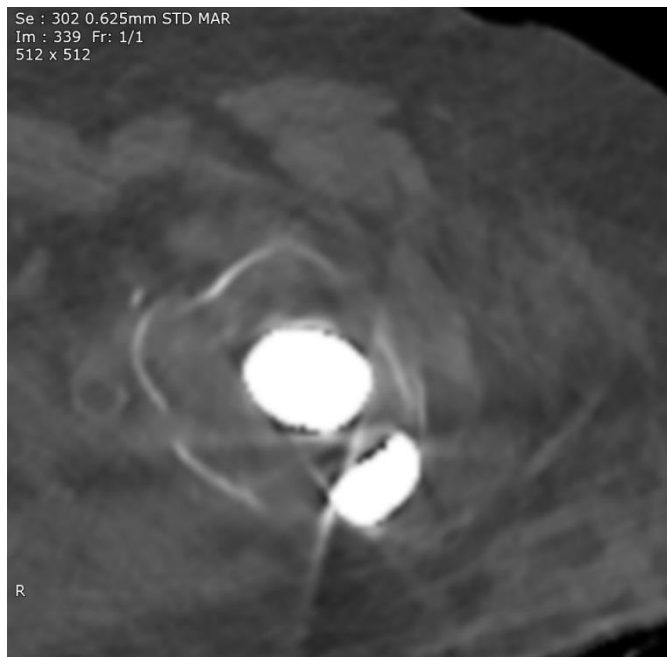
*Cambios postquirúrgicos, material intersomático L5-S1.
Mínima anterolistesis L5-S1, espondilolisis*

Reducción de artefactos metálicos (MAR) y fracturas periprotésicas



*Cambios postquirúrgicos, material intersomático L5-S1.
Mínima anterolistesis L5-S1, espondilolisis*

Reducción de artefactos metálicos (MAR) y fracturas periprotésicas



Fractura periprotésica. Presenta una línea de fractura adyacente al trocánter menor.

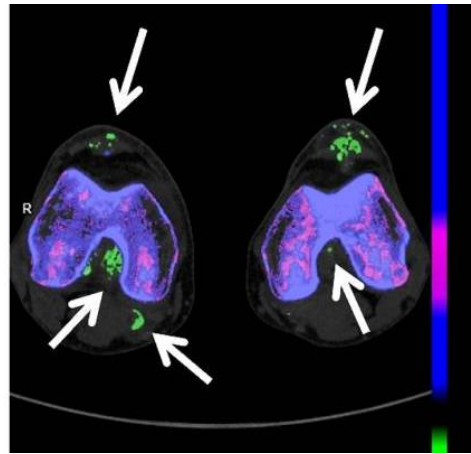
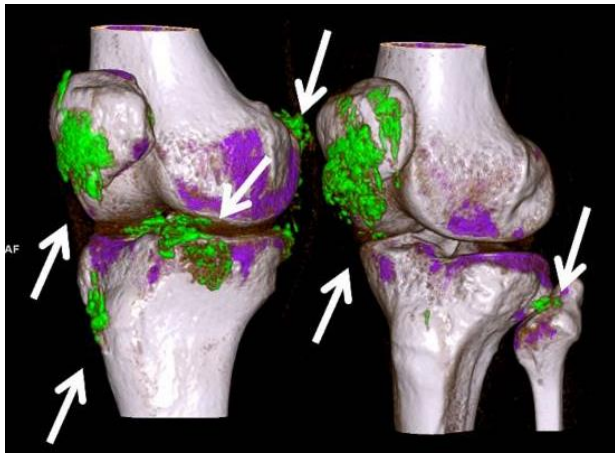
APLICACIONES DE LA TCDE EN LA PATOLOGÍA MÚSCULOESQUELÉTICA: Gota

- La artrocentesis con visualización mediante microscopía de luz polarizada de cristales de urato monosódico (UMS) constituye el estándar de oro para el diagnóstico de gota. No obstante, en situaciones donde la localización articular es de difícil acceso, el aspirado resulta insuficiente o no concluyente, o en presentaciones atípicas que representan un desafío diagnóstico, la tomografía computarizada de energía dual (TCDE) ofrece una alternativa diagnóstica no invasiva con sensibilidad del 78-100% y especificidad del 89-100%.
 - Esta tecnología permite discriminar el calcio, de alto número atómico, del ácido úrico, de bajo número atómico, así como distinguir tejidos blandos del hueso cortical y trabecular. Los cristales de UMS son identificados mediante algoritmos de descomposición material y posteriormente codificados por colores superpuestos sobre imágenes en escala de grises. Además, permite la cuantificación volumétrica precisa de la carga de cristales de UMS, lo cual posibilita determinar la gravedad de la enfermedad y monitorizar tanto el progreso como la respuesta al tratamiento.
-

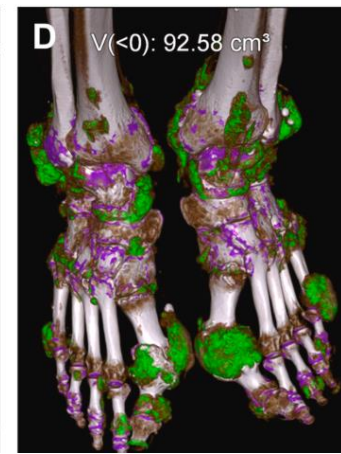
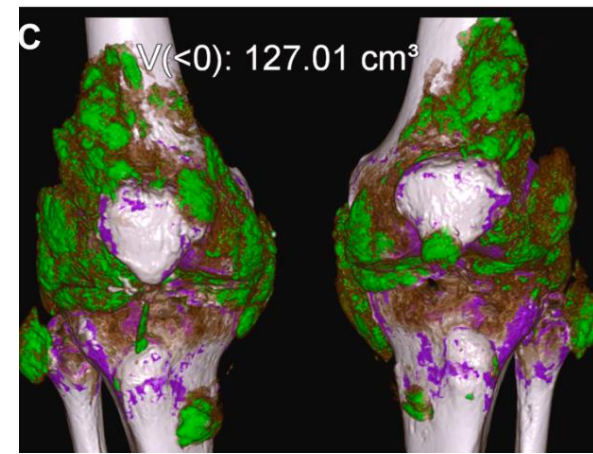
APLICACIONES DE LA TCDE EN LA PATOLOGÍA MÚSCULOESQUELÉTICA: **Gota**

- Sin embargo, la TCDE presenta limitaciones técnicas que deben tenerse en cuenta en su interpretación. Los artefactos constituyen la principal fuente de falsos positivos, siendo el más frecuente el relacionado con el lecho ungueal, las uñas y las callosidades, debido a que la queratina presenta propiedades de atenuación similares a las del UMS. Otros artefactos incluyen los asociados a la osteoartritis avanzada y al endurecimiento del haz. Asimismo, durante las primeras seis semanas de la enfermedad, los falsos negativos son más frecuentes, ya que la carga de UMS puede ser insuficiente.
-

APLICACIONES DE LA TCDE EN LA PATOLOGÍA MÚSCULOESQUELÉTICA: Gota



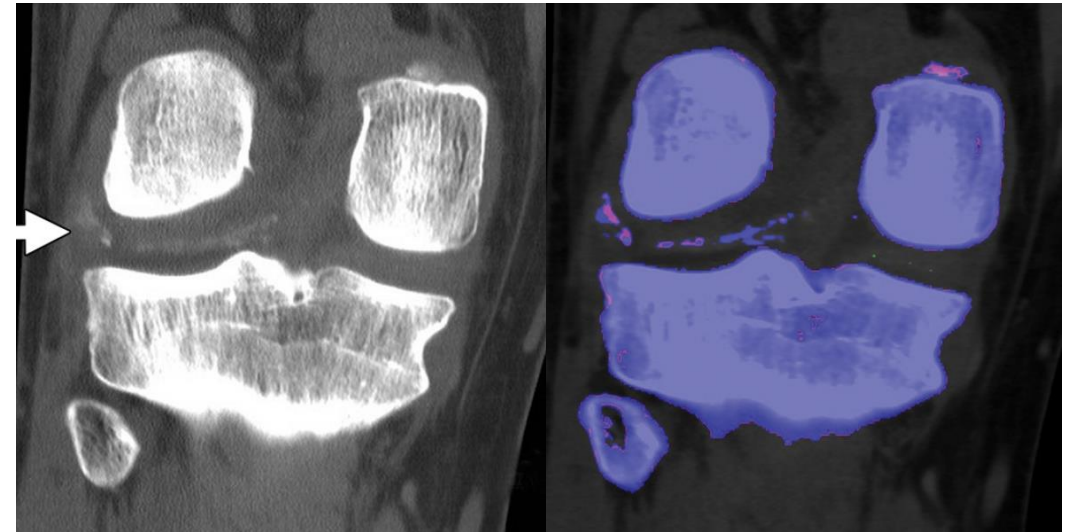
Gouty Arthropathy: Review of Clinical Manifestations and Treatment, with Emphasis on Imaging, Weaver JS. et al. (2021)¹²



Dual-Energy Computed Tomography and Beyond: Musculoskeletal System, Meer E. et al. (2023)²

APLICACIONES DE LA TCDE EN LA PATOLOGÍA MÚSCULOESQUELÉTICA: Pseudogota

- La pseudogota es otra artropatía inflamatoria causada por el depósito de cristales de pirofosfato de calcio, es uno de los diagnósticos diferenciales de la gota.
- La TCDE tiene una sensibilidad menor en el diagnóstico de esta entidad, pero constituye una potencial herramienta en la discriminación y cuantificación de estos cristales.



Fuente: Dual-Energy CT in Musculoskeletal Imaging: What Is the Role Beyond Gout?, Rajiah P. et al. (2019),₁

CONCLUSIÓN

- La TCDE es una alternativa viable y más accesible que la RM en el diagnóstico de patología musculoesquelética, y ofrece mayor precisión diagnóstica que la TC convencional, sin aumentar la exposición de radiación ionizante. Mantiene un potencial creciente de aplicaciones clínicas en conjunto con el desarrollo de otras tecnologías.
-

BIBLIOGRAFÍA

1. Rajiah P, Sundaram M, Subhas N. Dual-energy CT in musculoskeletal imaging: What is the role beyond gout? AJR Am J Roentgenol [Internet]. 2019;213(3):493–505. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2214/AJR.19.21095>
 2. Meer E, Patel M, Chan D, Sheikh AM, Nicolaou S. Dual-energy computed tomography and beyond: Musculoskeletal system. Radiol Clin North Am [Internet]. 2023;61(6):1097–110. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcl.2023.05.008>
 3. Duignan JA, Newman C, Sheikh A, Ouellette HA. Musculoskeletal applications of dual energy computed tomography (DECT): The established and the emerging. Semin Roentgenol [Internet]. 2024;59(4):363–77. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1053/j.ro.2024.07.003>
 4. Albrecht MH, Scholtz J-E, Hüsters K, Beeres M, Bucher AM, Kaup M, et al. Advanced image-based virtual monoenergetic dual-energy CT angiography of the abdomen: optimization of kiloelectron volt settings to improve image contrast. Eur Radiol [Internet]. 2016;26(6):1863–70. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s00330-015-3970-2>
 5. D'Angelo T, Cicero G, Mazziotti S, Ascenti G, Albrecht MH, Martin SS, et al. Dual energy computed tomography virtual monoenergetic imaging: technique and clinical applications. Br J Radiol [Internet]. 2019;92(1098):20180546. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1259/bjr.20180546>
 6. Chen Z, Chen Y, Zhang H, Jia X, Zheng X, Zuo T. Diagnostic accuracy of dual-energy computed tomography (DECT) to detect non-traumatic bone marrow edema: A systematic review and meta-analysis. Eur J Radiol [Internet]. 2022;153(110359):110359. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrad.2022.110359>
-

BIBLIOGRAFÍA

7. Simonetti I, Verde F, Palumbo L, Di Pietto F, Puglia M, Scaglione M, et al. Dual energy computed tomography evaluation of skeletal traumas. Eur J Radiol [Internet]. 2021;134(109456):109456. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrad.2020.109456>
 8. Narayanan A, Dettori N, Chalian M, Xi Y, Komarraju A, Chhabra A. Dual-energy CT-generated bone marrow oedema maps improve timely visualisation and recognition of acute lower extremity fractures. Clin Radiol [Internet]. 2021;76(9):710.e9-710.e14. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.crad.2021.05.004>
 9. Dareez NM, Dahlslett KH, Engesland E, Lindland ES. Scaphoid fracture: Bone marrow edema detected with dual-energy CT virtual non-calcium images and confirmed with MRI. Skeletal Radiol [Internet]. 2017;46(12):1753–6. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s00256-017-2730-6>
 10. Haider S, Pezeshk P, Xi Y, Abdellatif W, Chhabra A. Extent of bone marrow edema on dual-energy CT aids in differentiation of acute from post-acute fractures of lower legs. Eur Radiol [Internet]. 2023;33(6):4094–102. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s00330-022-09373-3>
 11. Cheong SCW, Yan YY, Sheikh A, Ouellette HA, Munk PL, Murray N, et al. Dual-energy CT applications in musculoskeletal disorders. Br J Radiol [Internet]. 2024;97(1156):705–15. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1093/bjr/tqae023>
 12. Weaver JS, Vina ER, Munk PL, Klauser AS, Elifritz JM, Taljanovic MS. Gouty arthropathy: Review of clinical manifestations and treatment, with emphasis on imaging. J Clin Med [Internet]. 2021;11(1):166. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/jcm11010166>
-