

# Métodos de Diagnóstico por Imágenes

Material complementario 1

## ■ Introducción

### ¿Qué es el Diagnóstico por Imágenes?

Es la rama de la medicina que permite examinar al paciente mediante imágenes obtenidas con diversas tecnologías.

Las imágenes son un gran complemento de la historia clínica y del examen físico. “Llegan más allá de donde ven los ojos o palpa la mano” (Leonard Swischuk). El primer método de diagnóstico por imágenes fue la radiografía, descubierta por el físico alemán Wilhelm Roentgen en 1895 (luego Premio Nobel). Por este motivo, históricamente se ha denominado “radiología” a nuestra especialidad.

Por muchas décadas, los únicos progresos consistían en el desarrollo de métodos derivados de la radiología como la radioscopy, angiografía por cateterismo, urografía, seriada gastroduodenal y colon por enema, entre otros. A partir de la década de 1970, se desarrollaron nuevas tecnologías como la ecografía, la tomografía computarizada, la resonancia magnética y otras, que dieron origen a la denominación más amplia y correcta de “Diagnóstico por Imágenes”. El antiguo “radiólogo” se transformó en el moderno “imagenólogo”.

Más tarde surgió una nueva subespecialidad que es la “radiología intervencionista” o simplemente “intervencionismo”, que incluye a todos los procedimientos diagnósticos (por ej. punción biopsia) o terapéuticos (por ej. drenaje de un absceso) guiados por imágenes. En este sentido, la especialidad “imágenes” ya no es solo diagnóstica, sino que también se ocupa del tratamiento, junto con los clínicos y los cirujanos.

Más recientemente, con el comienzo del siglo XXI, surgió un nuevo avance conceptual, que son las llamadas “imágenes moleculares” o “imágenes funcionales”. Incluyen a un conjunto de tecnologías como la tomografía por emisión de positrones, técnicas especiales de resonancia magnética y otras, que permiten estudiar diversas funciones *in vivo*.

En general se basan en el seguimiento dentro del cuerpo de moléculas “exógenas” o artificiales (por ej. radiofármacos o moléculas marcadas con isotopos

radiactivos) y “endógenas” o naturales (por ej. la difusión del agua en los espacios intracelular y extracelular).

En los últimos años hay una tendencia creciente a emplear métodos manuales o automatizados para medir lesiones, lo que se ha denominado “imágenes cuantitativas”, que permiten detectar imágenes patológicas y comparar su evolución en futuros controles de forma más objetiva.

Por lo tanto, las imágenes han recorrido un largo camino y en la actualidad se puede decir de ellas lo siguiente:

- Aportan no solo información anatómica sino también molecular o funcional.
- Sirven para el diagnóstico y también para el tratamiento.
- Se emplean cada vez más para cuantificar los procesos y evaluar el resultado del tratamiento.

A lo largo de este capítulo estudiaremos cada uno de los métodos o exámenes, así como sus ventajas y limitaciones, de las que surgen las principales indicaciones.

También haremos una revisión de los principales medios de contraste, marcadores y otras moléculas que se emplean con fines diagnósticos.

### Rol de las imágenes en la medicina actual

Luego de la historia clínica y el examen físico, el laboratorio y las imágenes son las dos herramientas principales del médico en el consultorio, la internación y la sala de emergencias.

Uno de los objetivos primordiales de este libro es motivar al futuro médico a estudiar estos valiosos métodos de diagnóstico, aprender a indicarlos correctamente y valorar sus resultados. Con seguridad será un mejor médico si sabe utilizar de manera correcta las imágenes.

La aparición de los rayos X significó una revolución similar al impacto del descubrimiento de la anestesia o de los antibióticos. Era la primera vez en la historia que se podía ver el “interior” del cuerpo de manera no invasiva. Antes solo era posible con la cirugía exploradora o la necropsia.

Los diversos exámenes por imágenes han permitido explorar la anatomía y la patología como nunca antes y

han revolucionado la medicina. Puede decirse que hay una ginecología y obstetricia antes y después de la ecografía, una neurología y neurocirugía antes y después de la tomografía computarizada y la resonancia magnética, una oncología antes y después de la tomografía computarizada y el PET/TC, así como muchos ejemplos más.

Las imágenes no solo sirven para diagnosticar enfermedades, también son muy útiles para valorar su extensión y gravedad, evolución, establecer pronósticos y controlar la respuesta al tratamiento. Se utilizan rutinariamente para evaluar los resultados de nuevos medicamentos y procedimientos médicos.

Es muy importante destacar que las imágenes constituyen un documento de alto valor asistencial, docente, científico y legal. Son una "prueba" o "evidencia" muy sólida.

De manera general puede decirse que un estudio está bien indicado cuando su resultado puede modificar la conducta médica, por ej.: ¿cirugía u otro tratamiento?, ¿el paciente está respondiendo a este medicamento o hay que cambiarlo? Estas son algunas preguntas comunes que las imágenes pueden ayudar a responder.

Nuestra especialidad sigue evolucionando al ritmo veloz de la computación y la biología. La secuencia de estudios (algoritmos o protocolos) que enseñamos hoy, probablemente se modificarán en los próximos años, dependiendo de los avances tecnológicos. Es una de las ramas más dinámicas de la medicina y es necesaria una actualización permanente para quienes se dedican a ella.

Los tres pilares básicos sobre los que asienta el conocimiento del imagenólogo son la anatomía, la patología clínica y la tecnología.

En síntesis, los grandes objetivos de la enseñanza de las imágenes podrían resumirse en:

- Conocer los diversos métodos de diagnóstico por imágenes.
- Comprender sus ventajas y sus limitaciones.
- Saber sus indicaciones más frecuentes.
- Poder elegir el examen inicial y establecer un plan diagnóstico ante un problema clínico, conociendo cuál es el examen de elección.
- Reconocer la anatomía normal.
- Identificar las patologías más frecuentes.
- Prevenir complicaciones, teniendo en cuenta los criterios de radioprotección, el uso seguro de medios de contraste y otros cuidados importantes.

Aprender a usar bien las imágenes mejora la medicina que practicamos y beneficia claramente a los pacientes.

## **Métodos de diagnóstico por imágenes**

### **Exámenes y procedimientos**

El Diagnóstico por Imágenes abarca los siguientes métodos principales (incluimos las siglas y acrónimos más utilizados en castellano):

- Radiología (RX).
- Ecografía o ultrasonido (ECO o US).
- Tomografía computarizada o tomografía (TC o TAC).
- Resonancia magnética o resonancia (RM o IRM).
- Medicina nuclear (MN).
- Tomografía por emisión de positrones (PET/TC).
- Angiografía digital por cateterismo (AD).
- Radiología intervencionista.

Cada uno de estos métodos incluye varios subtipos de exámenes y técnicas diferentes, que estudiaremos en los apartados dedicados a cada uno de ellos y que se resumen en la Tabla 1.1. Incluso con el creciente empleo de los modernos métodos por imágenes como la TC, la RM y la MN, las prácticas más numerosas siguen siendo la radiología y la ecografía.

## **Tipos de energía exploradora**

### **Introducción**

Para explorar el cuerpo humano cada examen utiliza diversos tipos de energía:

- Rayos X para RX, mamografía, angiografía y TC.
- Rayos gamma para medicina nuclear y PET.
- Ultrasonido para ECO.
- Campo magnético y ondas de radiofrecuencia para RM.

Estas "energías exploradoras" tienen la propiedad de "atravesar" el cuerpo y pueden ser registradas por los detectores de los equipos y luego ser transformadas en imágenes anatómicas y funcionales.

La mayoría de los exámenes utilizan una fuente exploradora externa como los rayos X, el haz de ultrasonido y las ondas radiofrecuencia, que interactúan con los tejidos y luego son registradas.

En cambio, en medicina nuclear y PET/TC la energía exploradora (rayos gamma) es emitida por los radiofármacos o trazadores inyectados por vía endovenosa (EV) u otras vías.

Teniendo en cuenta el uso de radiaciones ionizantes, los métodos pueden ser clasificados en dos grandes grupos:

- Los que utilizan como energía exploradora las radiaciones ionizantes:
  - Rayos X (por ej. RX, mamografía, TC, angiografía).
  - Rayos gamma (medicina nuclear y PET/TC).
- Los que no utilizan radiaciones ionizantes:
  - Ultrasonido (ECO).
  - Campo magnético y radiofrecuencia (RM).

Los que no emplean radiaciones ionizantes son los únicos que pueden ser utilizados durante el embarazo, salvo casos excepcionales. Nos referiremos en particular a este tema en el apartado sobre Radioprotección.

Lamentablemente ningún método puede resolver todos los problemas clínicos ni sirve para estudiar todos

**Tabla 1.1** Principales métodos de diagnóstico por imágenes

Métodos	Incluyen
Radiología	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Radiología simple</li> <li>▪ Radiología contrastada (por ej. tracto gastrointestinal, genitourinaria, etc.)</li> <li>▪ Radioscopia o fluoroscopia</li> </ul>
Mamografía	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mamografía</li> </ul>
Ecografía o ultrasonido	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Convencional (por ej. obstétrica, abdomen, tejidos blandos)</li> <li>▪ Endocavitaria (por ej. transvaginal, transrectal)</li> <li>▪ Eco-endoscopia (unida al endoscopio)</li> <li>▪ ECO Doppler (por ej. estudios vasculares, vascularización de nódulos)</li> <li>▪ Ecocardiografía</li> </ul>
Tomografía computarizada	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Helicoidal y multidetectores o multicorte</li> <li>▪ Técnicas especiales (por ej. angio-tomografía, uro-TC, endoscopia virtual, etc.)</li> </ul>
Resonancia magnética	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Convencional</li> <li>▪ Técnicas especiales (por ej. angio-RM, colangio-RM, técnica de supresión grasa, etc.)</li> <li>▪ RM espectroscopia</li> <li>▪ RM funcional</li> <li>▪ RM tractografía</li> </ul>
Medicina nuclear	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cámara gamma (centellografía)</li> <li>▪ SPECT (<i>single photon computed tomography</i>)</li> </ul>
Tomografía por emisión de positrones	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ PET fusionada con TC o híbrido (PET/TC)</li> </ul>
Angiografía	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Angiografía por cateterismo</li> <li>▪ Intervencionismo vascular</li> </ul>
Radiología intervencionista	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Diagnóstica</li> <li>▪ Terapéutica</li> </ul>
Imágenes moleculares o funcionales	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ RM</li> <li>▪ MN</li> <li>▪ PET</li> <li>▪ Imágenes ópticas</li> </ul>

los órganos y sus patologías. Lo mismo ocurre con los exámenes de laboratorio u otros procedimientos diagnósticos (endoscopia, laparoscopia, etc.).

Cada método, al igual que las herramientas de un taller, tiene un uso específico, con fortalezas y debilidades. Un mismo tejido normal o patológico puede ser más o menos visible con distintos exámenes, de acuerdo con sus propiedades físicas en relación con la energía usada para explorarlo. Por este motivo, hay exámenes con mayor o menor sensibilidad para detectar cada patología.

### Rayos X

Los rayos X atraviesan sin inconveniente la mayor parte de las estructuras anatómicas. Son ideales cuando es necesario estudiar regiones con alto componente de aire o calcio, como ocurre con el tórax y el esqueleto.

Los métodos más útiles para estudiar los pulmones y los huesos son los que usan rayos X, como la radiología y la TC. El resultado refleja la mayor o menor

atenuación de los rayos X, de acuerdo con la densidad de los tejidos. Dependiendo de su densidad, una lesión puede ser hiperdensa o hiperatenuante o "blanca", por ejemplo una calcificación pleural o puede ser hipodensa o hipoatenuante u "oscura", por ejemplo una bulla enfiestemosa con aire.

### Rayos gamma

La MN y el PET/TC dependen de la mayor o menor captación del radiotrazador o radiofármaco por parte de los tejidos. La avidez por el radiotrazador está vinculada con la función del órgano (por ej. iodo para la tiroides, glucosa marcada para los tumores, etc.). El resultado se informa como hipercaptante o "caliente" y en el otro extremo, hipocaptante o "fría".

### Ultrasonido

El ultrasonido empleado en ECO no es bien conducido por el aire y el calcio, que dificultan su paso, pero puede atravesar los órganos con contenido sólido y

líquido. Por este motivo, la ECO es más útil para estudiar órganos abdominales y pelvianos (siempre que no se interponga aire del tracto digestivo). Por el contrario, es un método muy limitado para el examen del tórax y el esqueleto.

El resultado refleja la mayor o menor impedancia acústica de los tejidos al paso del ultrasonido, que genera más o menos rebotes o "ecos". Dependiendo de su composición una lesión puede ser hiperecoica ("brillante"), como por ejemplo una litiasis, o por el contrario puede ser hipoecoica ("oscura"), como un quiste con contenido líquido.

### Campo magnético y radiofrecuencia

La RM emplea dos energías, el campo magnético (imán) y la radiofrecuencia (ondas de radio) para explorar los átomos de hidrógeno de los tejidos, que dependen sobre todo del contenido acuoso y adiposo. Es muy apropiada para examinar el sistema nervioso y la médula espinal (alto contenido acuoso y graso), la médula ósea y los órganos con contenido sólido y líquido (por ej. articulaciones, hígado, riñones, etc.).

Las estructuras "secas" o pobres en agua, como las calcificaciones, hueso cortical y pulmones, no son "candidatas físicamente ideales".

En RM se registra la menor o mayor señal que se obtiene al explorar un tejido. Se utilizan los términos hipointensa o hiposeñal ("oscura") e hiperintensa o hiposeñal ("brillante") en el caso contrario, como por ejemplo el líquido cefalorraquídeo (LCR) estudiado con técnica T1 ("LCR negro") y T2 ("LCR blanco"), respectivamente.

### Ventajas y limitaciones de cada método

Teniendo en cuenta las propiedades de la energía exploradora y de los tejidos, podemos empezar a comprender las fortalezas y las debilidades de cada método y sus aplicaciones prácticas.

Si se buscan calcificaciones (por ej. litiasis renales), no hay método más sensible que la TC; en cambio estas mismas calcificaciones pueden no ser visibles con RM, que sin embargo es un método tan útil y que supera a la TC para otros objetivos.

Un hueso será "transparente" y bien estudiado por una RX, pero será una barrera infranqueable para la ECO. Un quiste será "evidente" para la ECO, pero denso u opaco para una RX.

Como se ve, la interacción entre energía exploradora y el tejido a analizar tiene numerosísimas variantes, por eso, para estudiar tantos tejidos y órganos disímiles, son necesarios los diversos exámenes con energías exploradoras distintas.

De este conocimiento surgen naturalmente las ventajas y limitaciones de cada tecnología, así como sus indicaciones. En la Tabla 1.2 se clasifican los métodos de acuerdo con la energía que emplean y su interacción con la materia.

### Resolución espacial, de contraste y temporal

La capacidad de un examen por imágenes para detectar una lesión depende sobre todo de tres factores: la resolución espacial, la resolución de contraste y la resolución temporal.

La resolución espacial es la capacidad que tienen un método o un equipo para distinguir imágenes muy pequeñas. Por ej. la TC puede detectar lesiones más pequeñas que la cámara gamma de medicina nuclear.

A mayor resolución espacial, las imágenes tienen mayor calidad y detalle, con mejor definición de los contornos. Otro ejemplo es la TC de alta resolución, que permite estudiar el intersticio pulmonar, que no es visible con cortes gruesos de TC. Como regla general, a mayor número de píxeles y menor espesor de corte, mayor resolución.

La resolución de contraste es la capacidad que tiene un examen para distinguir entre lesiones o tejidos de distinta composición. Por ej. la ECO tiene mayor capacidad de diferenciar líquidos de sólidos que la RX simple. Sin embargo, el contraste no solo depende de la energía exploradora sino también de las diferencias físico-químicas de la lesión en estudio, respecto de los tejidos que la rodean.

Para que un objeto sea visible o se destaque del entorno es necesario que tenga un tono distinto, es decir que "contraste" contra el "fondo" vecino. El aire, los tejidos grasos y los líquidos se destacan más fácilmente; en cambio, no es tan sencillo distinguir un tumor dentro de un órgano sólido (por ej. hígado, riñón, etc.), porque tienen similar "textura", compuesta también por células.

Muchas lesiones son visibles con facilidad por su "contraste natural". Por ej. un nódulo pulmonar contrasta de manera natural contra el aire que lo rodea; un lipoma se distingue fácilmente del hígado o de un músculo vecino.

En otros casos, es necesario recurrir a un "contraste artificial" administrado al paciente por vía endovenosa, oral u otras, que permita "realzar", "teñir" o "contrastar" el objeto buscado, que puede ser un tumor, un vaso sanguíneo, etc. En el apartado específico nos dedicaremos a los medios de contraste y a los radiofármacos que sirven para cambiar las características de una lesión y hacerla más visible en los exámenes por imágenes.

La resolución temporal es la capacidad que tienen un método o un equipo para distinguir fenómenos que ocurren muy rápidamente, como los latidos cardíacos, los movimientos respiratorios, etc. Con la tecnología actual, por ejemplo, la TC tiene mayor resolución temporal (es mucho más veloz) que la RM. Los tomógrafos pueden registrar imágenes en menos de un segundo, lo que es muy útil para estudiar el corazón y los vasos coronarios.

En síntesis, la detección de una lesión depende principalmente de cuatro aspectos, que son:

**Tabla 1.2** Energía exploradora utilizada

Energía	Examen	Evaluá	Resultado
Rayos X	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Radiografía</li> <li>▪ Mamografía</li> <li>▪ Tomografía</li> <li>▪ Angiografía</li> </ul>	Atenuación	Densidad o atenuación
Rayos gamma	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Medicina nuclear</li> <li>▪ PET</li> </ul>	Función o afinidad química (receptores, procesos metabólicos)	Captación
Ondas de ultrasonido	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ecografía</li> </ul>	Impedancia acústica	Ecogenicidad
Magnetismo y ondas de radiofrecuencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Resonancia</li> </ul>	Átomos o protones de hidrógeno	Intensidad de señal

- Método explorador (energía y características técnicas del equipo).
- Tamaño de la lesión (resolución espacial).
- Contraste natural o artificial respecto del entorno (resolución de contraste).
- Velocidad de movimiento del objeto (resolución temporal).

Por todos estos motivos no debe extrañar, por ejemplo, que la vesícula biliar se vea mejor con ECO que con TC; que una fractura sea más visible en TC que en una RX simple; que un pequeño infarto cerebral sea evidente con RM pero no con TC y así habría muchos ejemplos.

Estos conceptos demuestran la importancia de conocer los métodos, con sus ventajas y limitaciones, de los que surge su uso racional y las indicaciones apropiadas.

## ■ Validez de una prueba diagnóstica

### Sensibilidad y especificidad

Como hemos visto, dependiendo de la energía y la tecnología que se utilicen para explorar el cuerpo, cada examen puede brindar más o menos información.

Otro aspecto importante es comprender la validez de una prueba diagnóstica. Dos métodos pueden detectar una enfermedad, pero también interesa saber cuál tiene más "sensibilidad" (capacidad de un test para detectar los verdaderos positivos) y cuál tiene más "especificidad" (capacidad de un test para detectar los verdaderos negativos).

Un método ideal debe ser a la vez sensible y específico. Si tiene alta sensibilidad pero poca "especificidad", habrá más "falsos positivos" mezclados con los verdaderamente enfermos. Si es muy específico pero poco sensible, habrá más "falsos negativos" mezclados con los verdaderamente sanos.

Por ejemplo, el centellograma es un examen muy sensible para detectar metástasis óseas, pero poco específico porque el radiofármaco también es captado en

zonas de artritis que son falsos positivos. En cambio, la RM es más específica, porque puede diferenciar mejor las verdaderas metástasis de la patología inflamatoria. Se puede deducir que el centellograma óseo tiene un alto "valor predictivo negativo", porque siendo un examen tan sensible, si es negativo sería muy raro que hubiera una metástasis. Pero tiene un bajo "valor predictivo positivo", por su menor especificidad.

Incluso un mismo método puede ser más o menos sensible y específico, dependiendo del tamaño de la lesión. Lo mismo ocurre con los valores de "corte" o "rango" normal en los exámenes de laboratorio. Por ejemplo, si en TC de tórax utilizáramos el límite de 15 mm para determinar si un ganglio es patológico o no, el examen sería muy específico (porque prácticamente todos los ganglios encontrados serían verdaderamente patológicos), pero poco sensible (porque habría ganglios de menor tamaño que también están comprometidos). Si en cambio, usáramos como límite 5 mm, el método sería muy sensible (porque detectaría prácticamente todos los ganglios anormales), pero poco específico (porque también consideraría como patológicos a ganglios que en realidad están dentro de límite normal). Una "solución de compromiso" es considerar un límite de 10 mm, que cumple criterios de sensibilidad y especificidad aceptables.

Los conceptos de sensibilidad, especificidad, falso positivo, falso negativo, valor predictivo positivo y valor predictivo negativo son importantes y pueden aplicarse a cualquier examen, ya sea clínico, de laboratorio o de imágenes. Brindan una perspectiva importante para comprender el valor de una prueba diagnóstica y sus consecuencias prácticas.

Algunos ejemplos pueden servir para aclarar este punto: ¿un bazo no palpable permite descartar patología esplénica?, ¿el aumento del antígeno prostático específico es siempre un signo de cáncer de próstata o hay falsos positivos?, ¿una ECO negativa permite descartar metástasis hepáticas?, son algunas preguntas cotidianas y es importante poner en perspectiva cuán confiable es la información que recibimos.

## Radiaciones ionizantes y criterios de radioprotección

### Radiaciones ionizantes

#### Introducción

Los rayos X y los rayos gamma son radiaciones y comparten el espectro de las ondas electromagnéticas con otras, como la luz ultravioleta, luz visible, luz infrarroja, microondas y ondas de radio (Figura 1.1). Las radiaciones electromagnéticas son representadas como diminutos paquetes de energía llamados fotones, que son emitidos por una fuente y que viajan a la velocidad de la luz (aproximadamente 300 000 km/s).

A menor longitud de onda, mayor energía y capacidad de penetración. Por esta propiedad física los fotones de rayos X y rayos gamma pueden penetrar la materia, lo que no ocurre con otras ondas electromagnéticas (por ej. la luz visible).

#### Tubo de rayos X

Para los exámenes radiológicos, el paciente es interpuesto entre el tubo de rayos X y un elemento detector para obtener imágenes estáticas (película tradicional o detector digital) o dinámicas (pantalla radioscópica convencional o digital).

Las radiaciones son producidas por un tubo de rayos X, que es un tubo de rayos catódicos compuesto por una ampolla de vidrio, que contiene un cátodo y un ánodo.

El cátodo está formado por un filamento o resistencia que al ser cargado eléctricamente se torna incandescente y genera una nube de electrones. Aplicando una diferencia de potencial eléctrico, se produce un flujo de electrones desde el cátodo hacia el ánodo. El choque de los electrones contra el ánodo libera energía en forma de rayos X y de calor.

De acuerdo con la cantidad de miliamperios y kilovoltios aplicados en la corriente eléctrica, se obtienen diferentes cantidades y calidades de rayos X.

La ampolla está blindada mediante una carcasa de plomo y tiene una pequeña ventana por la cual se emiten los rayos. Las radiaciones son circunscriptas y focalizadas mediante colimadores plomados, para evitar irradiar áreas no deseadas.

#### Propiedades de los rayos X

Los rayos X tienen cuatro propiedades características:

- Pueden atravesar los objetos.
- Producen luz al incidir sobre sustancias fluorescentes.
- Son un fenómeno *on-off* (prendido-apagado).
- Tienen acción ionizante.

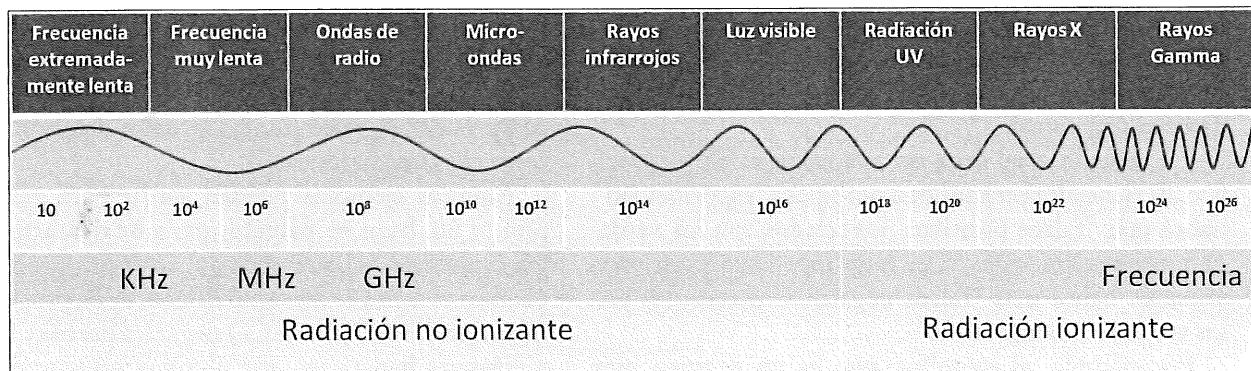
Los rayos X pueden atravesar los objetos. Son atenuados o "frenados" dependiendo del peso atómico y la densidad de las estructuras que atraviesan. Esta propiedad es utilizada en RX, mamografía, angiografía y TC. No solo se utilizan en medicina, también en la industria (por ej. rotura de materiales), arte (por ej. pinturas y objetos antiguos) y seguridad (por ej. aeropuertos).

Ciertos materiales como el plomo absorben en gran medida los rayos X, capacidad que es utilizada en la radioprotección.

Los rayos X producen luz al incidir sobre sustancias fluorescentes (por ej. radioscopía). Actualmente se utilizan detectores digitales (RX digital, TC, etc.) que son estimulados por las radiaciones.

Son un fenómeno *on-off* (como encender o apagar la luz), es decir que la radiación no permanece en el ambiente luego del disparo. Se diferencian de los radiofármacos (MN y PET/TC) que tienen un decaimiento progresivo y emiten radiaciones al ambiente por un período de tiempo.

Los rayos X tienen acción ionizante. Por su alta energía pueden disociar a las sustancias en iones. Esta acción biológica genera diversas reacciones en los tejidos y puede afectar al ADN con su potencial de daño celular y genético. Esta propiedad se aprovecha en radioterapia para tratar el cáncer.



**Figura 1.1** Espectro de ondas electromagnéticas. Los rayos X y los rayos gamma pueden atravesar los objetos. Son radiaciones ionizantes.

## Criterios de radioprotección

### Riesgos y cuidados

La radiación puede causar efectos adversos no dependientes de la dosis, llamados efectos "estocásticos" (por ej. mutaciones genéticas y carcinogénesis) y otros dependientes de la dosis llamados efectos "determinísticos" (por ej. eritema, cataratas, fibrosis, disminución de la hemopoiesis, etc.).

Por este motivo, se han desarrollado numerosas medidas de radioprotección, que incluyen el uso de blindaje plomado; el desarrollo de la radiología digital, que utiliza menores dosis; nuevos tomógrafos que también emplean menos radiación; entre otros avances.

Conviene recordar que la mayor fuente de radiación para los humanos es la propia naturaleza (radiaciones solares, isótopos naturales, etc.). Solo aproximadamente el 20% de las radiaciones son de origen médico, para fines diagnósticos y terapéuticos.

Varios métodos de diagnóstico emplean radiaciones ionizantes. Los rayos X son la base de radiología, radioscopy y estudios contrastados, mamografía, angiografía y tomografía computarizada. Los rayos gamma se usan en medicina nuclear y en la tomografía por emisión de positrones.

Es necesario que el médico conozca los efectos adversos de las radiaciones y tome precauciones sencillas, para aprovechar sus beneficios y evitar o reducir los efectos indeseados. En realidad, los riesgos son de bajísima frecuencia y los beneficios los superan con creces.

Las radiaciones ionizantes tienen mayor efecto sobre el feto, en particular durante el primer trimestre del embarazo (período de organogénesis), así como en niños y también en los tejidos con alta mitosis, más radiosensibles y expuestos como la glándula tiroides, gónadas, médula ósea, etc.

Antes de indicar o de realizar un examen con rayos X o gamma es muy importante preguntar siempre a las mujeres en edad fértil si tienen un atraso menstrual, porque algunas pueden desconocer que están embarazadas. Esta pregunta debe ser una norma siempre que se indican

RX, TC, estudios contrastados, centellografías o cualquier examen que emplea radiaciones. En caso de dudas se puede recurrir a un sencillo test de embarazo u optar por un examen sin radiaciones (por ej. ECO y RM). En algunos casos, a pesar del embarazo, no queda otra opción que realizar un examen con radiaciones (por ej. RX o TC en una politraumatizada, sospecha de un tumor o tuberculosis, angiografía por un aneurisma, etc.). En estos casos tan especiales se pueden proteger el abdomen y la pelvis con delantales plomados que reducen la radiación recibida, aunque no la anulan completamente.

La radioprotección se basa en cuatro principios básicos: dosis (la menor posible), tiempo (el menor posible), distancia (la mayor posible) y blindaje (por ej. plomo).

Deben blindarse las paredes y las aberturas de los ambientes donde se encuentran instalados los equipos y los fármacos emisores de radiaciones ionizantes.

La dosis anual límite recomendada actualmente para los radiólogos es de 5 mSv/año y para la población en general (no pacientes) es de 1 mSv/año. Conviene recordar que 1 miliSievert (mSv) equivale a 0,1 REM (1 Sv = 100 REM).

Una radiografía simple de tórax corresponde a 0,15 mSv. Los estudios radiológicos contrastados, las tomografías, las angiografías, las cirugías e intervencionismo con radioscopy, los estudios nucleares y PET/TC son los que emplean mayores dosis.

Dado que los estudios por imágenes bien indicados son necesarios y muchas veces imprescindibles, respecto de la radiación se aconseja seguir el criterio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), es decir "tan baja como sea razonablemente posible". No se debe ser ni descuidado ni fóbico.

Conviene recordar que muchos diagnósticos pueden ser resueltos con ECO o RM, que no emplean radiaciones ionizantes y pueden ser una alternativa adecuada. Particularmente, la ECO es ideal y el examen de elección para el estudio de embarazo, niños, mujeres en edad fértil, tiroides, gónadas, etc.

En la Tabla 1.3 se clasifican los métodos sin y con radiaciones ionizantes.

**Tabla 1.3** Métodos sin y con radiaciones ionizantes

Radiaciones ionizantes	Métodos
Sin radiaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ecografía</li> <li>▪ Resonancia magnética</li> </ul>
Con radiaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Radiología</li> <li>▪ Radioscopia y estudios contrastados (seriada gastroduodenal, colon por enema, etc.)</li> <li>▪ Mamografía</li> <li>▪ Angiografía</li> <li>▪ Tomografía computarizada</li> <li>▪ Intervencionismo bajo RX, TC o AD</li> <li>▪ Medicina nuclear (centellografía, cámara gamma, SPECT).</li> <li>▪ PET/TC</li> </ul>

## ■ Medios o sustancias de contraste

### Introducción

En imágenes se emplean diversos medios o sustancias de contraste. El objetivo común es “reforzar”, “teñir” o “realzar” una estructura normal o patológica para que se distinga o resalte del resto. Por ej., con el contraste oral se rellena la luz del tracto digestivo (seriada gastroduodenal, colon por enema, TC, etc.), con el contraste endovascular se visualizan los vasos y las lesiones hipervasculares (por ej. tumores, abscesos, etc.).

Se administran por diversas vías:

- Endovenosa (TC, RM, urograma, etc.).
- Oral (seriada esofágica y gastroduodenal, tránsito intestinal, TC, etc.).
- Enema (colon por enema).
- Arterial (angiografía por cateterismo).
- Intratecal (mielografía).
- Intraarticular (artrografía).

No se debe confundir a las sustancias de contraste con los radiofármacos o trazadores empleados en medicina nuclear.

Los medios de contraste más usados son:

- Iodados (por ej. TC, estudios urinarios, angiografía).

- Baritados (por ej. estudios radiológicos del tracto digestivo).
- Gadolinios (por ej. RM).
- En algunos casos basta utilizar aire o agua (por ej. TC, RM).

Cuando se habla de exámenes con “doble contraste” se hace referencia al uso combinado de dos medios, como el bario y el aire para “pintar” mejor las paredes del tubo digestivo y distender su luz, lo que facilita la detección de pequeños pólipos, úlceras, etc.

En la Tabla 1.4 se enumeran los principales medios de contraste, sus indicaciones y vías de administración.

### Contrastes iodados

#### Introducción

Son sales de iodo con alta densidad radiológica, que permite “realzar” diversas estructuras. Los órganos y los tejidos blandos tienen una densidad similar al agua (que constituye alrededor del 70% de nuestro cuerpo), mientras que el iodo es cuatro a cinco veces más denso.

Se utilizan en radiología, tomografía y en angiografía por cateterismo.

En RX para estudiar el tracto urinario (por ej. urograma o pielografía EV, uretrocistografía, etc.), el

**Tabla 1.4** Medios de contraste

Medio de contraste	Métodos	Indicaciones y vía de administración
Iodados	Radiológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Urograma excretor (endovenosa)</li> </ul>
	Radioscópicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pielografía (por nefrostomía o ascendente)</li> <li>▪ Histerosalpingografía (catéter)</li> <li>▪ Sialografía (catéter)</li> <li>▪ Tubo digestivo (oral o por sonda) como alternativa al bario</li> <li>▪ Urografía y cistografía (sonda)</li> <li>▪ Colangiografías (por catéter o punción)</li> <li>▪ Artrografía (intraarticular)</li> <li>▪ Fistulografías (por catéter)</li> </ul>
	Angiografía	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Arteriografía (arterial)</li> <li>▪ Flebografía (venosa)</li> </ul>
	Tomografía	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Endovenosa para vasos y patología</li> <li>▪ Oral para el tubo digestivo (diluido)</li> </ul>
Bario	Radioscópicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Deglución y esofagograma (oral)</li> <li>▪ Seriada gastroduodenal (oral)</li> <li>▪ Tránsito intestinal (oral)</li> <li>▪ Colon por enema</li> </ul>
	Tomografía	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Oral para el tubo digestivo (diluido)</li> </ul>
Otros (aire, agua, etc.)	Radioscopia y tomografía	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estudios especiales del tracto digestivo, etc.</li> </ul>
Gadolinio	Resonancia	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Endovenoso para vasos y patología</li> </ul>
	Angiografía y tomografía	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Como alternativa al iodo cuando está contraindicado</li> </ul>
Microburbujas	Ecografía y Doppler	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Resalta el flujo en vasos, tumores, tracto urinario, etc.</li> </ul>

tracto ginecológico (por ej. histerosalpingografía), para fistulografías o estudios a través de catéteres (por ej. fistulografías, colangiografía, pielografía por nefrostomía, etc.) y también pueden ser una alternativa al bario, en algunos exámenes del tracto digestivo.

En TC los contrastes iodados sirven para realzar los vasos, órganos y lesiones, según su grado de vascularización. En angiografía por cateterismo para contrastar un territorio vascular arterial (arteriografía) o venoso (flebografía).

Una vez inyectados por vía endovenosa (EV) se distribuyen por el torrente circulatorio hacia todo el cuerpo. A mayor flujo sanguíneo, mayor tinción con el contraste iodado.

Estos contrastes son excretados principalmente por vía renal y en menor medida por vía hepatobiliar. En caso de falla renal, se altera su eliminación y están contraindicados. Con función renal normal, la mayoría del contraste se excreta luego de algunas pocas horas.

Por su osmolaridad, los contrastes iodados se clasifican en hiperosmolares, isoosmolares o hiposmolares respecto de plasma. Pueden ser iónicos o no iónicos. Los más seguros son los no iónicos de baja osmolaridad, que reducen significativamente el riesgo de reacciones adversas.

En condiciones normales, cuando son inyectados por vía EV, los contrastes iodados no atraviesan la barrera hematoencefálica, salvo que haya ruptura de esta por infartos, infecciones, tumores, etc.

Está formalmente contraindicada la inyección directa de las sustancias iodadas comunes usadas en TC, urografía o angiografía en el sistema nervioso central por vía intratecal (punción lumbar o cisternal o catéter intraventricular), porque producen convulsiones y graves reacciones adversas por irritación química. Para el sistema nervioso existen preparados iodados especiales no neurotóxicos, que pueden usarse por vía intratecal para efectuar mielografías, radiculografías y ventriculografías. Afortunadamente estos exámenes invasivos son utilizados cada vez menos, porque han sido reemplazados por la RM, evitando la punción lumbar y el uso de contrastes intratecales.

#### Reacciones adversas a los medios de contraste iodados

Como ocurre con cualquier fármaco, existen reacciones adversas y contraindicaciones para el uso del iodo que el médico debe conocer para prevenir y tratar adecuadamente. Sus causas no son del todo conocidas, aunque se aceptan dos mecanismos fisiopatológicos principales, llamados "por toxicidad" y "por hipersensibilidad".

Las reacciones "por toxicidad" se producen por la acción directa de las sustancias iodadas sobre los tejidos y se relacionan con el volumen y la osmolaridad del contraste inyectado. Los más afectados por este mecanismo son los riñones, el sistema cardiovascular y el

sistema nervioso. Son particularmente vulnerables los pacientes con falla renal previa, deshidratación, diabetes, hipertensión grave, cardiopatías, personas de edad avanzada, en mal estado general (oncológicos) y los enfermos con mieloma múltiple y colagenopatías.

Por estos motivos, siempre se recomienda que el paciente esté bien hidratado y asegurarse de que tenga una buena función renal. Se debe tener en cuenta que los contrastes iodados pueden producir deterioro de la función renal (nefropatía por medios de contraste) y falla renal aguda; en el sistema cardiovascular pueden causar hipotensión, reacciones vasovagales y arritmias.

Las reacciones "por hipersensibilidad o anafilactoides" están relacionadas con la liberación de histamina por los mastocitos y otros factores (complemento, factores de coagulación, fibrinólisis, etc.). A diferencia de las reacciones tóxicas, su aparición y gravedad son independientes de la dosis inyectada.

No hay evidencia hasta el presente que justifique los test de alergia previos (pruebas cutáneas de hipersensibilidad), porque un test negativo o incluso el antecedente de estudios previos con iodo sin inconvenientes no permiten descartar la posibilidad de una reacción adversa grave en el futuro.

La gran mayoría de las reacciones son inmediatas, alrededor del 70% en los primeros 5 minutos y más del 95% en los primeros 20 minutos. Las reacciones tardías son muy raras, por lo general con urticaria y angioedema.

De acuerdo con su severidad las reacciones adversas se clasifican en leves, moderadas y graves:

- Afortunadamente la gran mayoría (superior al 95%) de las reacciones son leves y por lo general no requieren tratamiento. Incluyen náuseas, vómitos, estornudos, rubicundez o calor intenso en el cuerpo, palidez, sudor, cefalea y exantema localizado.
- Las reacciones moderadas son poco frecuentes y requieren de tratamiento. Incluyen compromiso respiratorio y cardiovascular (por ej. broncoespasmo, disnea, estridor, taquicardia o bradicardia, hipotensión o hipertensión), urticaria extensa, dolor torácico o abdominal y tromboflebitis química en la zona de inyección.
- Las reacciones graves son raras, se presentan en menos del 1% de los casos y requieren de tratamiento e internación. Incluyen el edema laringeo, shock, arritmias, paro cardiorespiratorio, pérdida de conciencia y convulsiones.

En el pasado, los casos fatales ocurrían en alrededor de 1 de cada 100 000 a 170 000 exámenes, dependiendo de la población de pacientes atendidos, los contrastes utilizados y otras variables. Sin embargo, el uso creciente de los modernos contrastes iodados no iónicos e hiposmolares ha reducido significativamente las reacciones adversas graves, que hoy son excepcionales.

Antes de usar contrastes iodados, es necesario identificar a los pacientes con riesgo aumentado mediante

un interrogatorio cuidadoso y la historia clínica. Todos los pacientes con antecedentes de asma, hiperreactividad bronquial e historia de dermatitis atópica (a diversos productos) tienen un riesgo aumentado de reacciones anafilactoides. Como hemos visto, también son factores de riesgo para las reacciones tóxicas la deshidratación, enfermedad cardiovascular y renal previa, mal estado general y edad avanzada.

Los contrastes iódados por vía endovascular están contraindicados en los pacientes con antecedentes de reacciones previas al iodo e insuficiencia renal. Tampoco deben emplearse en el embarazo, salvo casos excepcionales con riesgo de vida para la madre.

El paciente debe ser informado de las potenciales reacciones adversas a los medios de contraste. Es necesario que lea y que firme un formulario de consentimiento informado dando su conformidad. Si es menor o incapacitado, el consentimiento puede ser proporcionado por el familiar o tutor a cargo.

La mayoría de las reacciones leves son autolimitadas y por lo general no requieren tratamiento, aunque el paciente debe ser observado antes de ser dado de alta. Las reacciones moderadas se tratan con antihistamínicos y corticoides de rápida disponibilidad (hidrocortisona) por vía endovenosa. Las reacciones graves se tratan con adrenalina subcutánea, antihistamínicos (difenhidramina) y corticoides de acción rápida por vía endovenosa, ventilación con ambú y eventualmente intubación y reanimación cardiorespiratoria (Tabla 1.5).

Si el paciente tiene antecedentes de riesgo, puede optarse por tres posibilidades:

- Elegir otro estudio sin iodo, por ej. en lugar de una TC con contraste EV elegir ECO o RM, si podrían brindar la información necesaria.
- Realizar el examen sin contraste, lo que en muchos casos es suficiente, por ej. TC de tórax sin contraste EV.
- Si no existe alternativa y es necesario el examen con contraste iódado (por ej. coronariografía por cateterismo, TC con contraste), se puede premedicar al paciente (con corticoides y antihistamínicos durante los dos días previos y media hora antes del examen).

**Tabla 1.5** Tratamiento de las reacciones adversas a los medios de contraste

Clinica	Tratamiento (*)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Colapso cardiocirculatorio</li> <li>▪ Hipotensión, taquicardia, sudoración, pérdida de conciencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Elevar miembros</li> <li>▪ Suero EV a goteo rápido</li> <li>▪ Oxígeno</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reacción anafilactoide</li> <li>▪ <i>Rush</i>, exantema, urticaria, angioedema, broncoespasmo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Adrenalina (1/1000): 0,3 mL SC</li> <li>▪ Antihistamínicos: difenhidramina 50 mg EV.</li> <li>▪ Hidrocortisona 500 mg EV.</li> <li>▪ Ventilación con ambú o intubación si es necesario</li> </ul>

(\*) Consenso de la Asociación Argentina de Alergia e Inmunología Clínica y la Sociedad Argentina de Radiología del año 2000.

### Contrastes baritados

El bario se emplea casi exclusivamente para los exámenes digestivos: por vía oral (o por sonda) para estudios de deglución, esofagograma, seriada gastroduodenal, tránsito intestinal y enteroclisis y por vía rectal para el examen del colon por enema.

El examen convencional o con contraste "simple" se realiza con una solución de bario que sirve para llenar la luz del tracto digestivo, para demostrar estenosis, alteraciones de los contornos y de la motilidad. La desventaja es que puede ocultar lesiones pequeñas.

El examen con "doble contraste" combina el bario con el aire. El bario se adhiere a las paredes, mientras que el aire distiende y transparenta la luz del tubo digestivo. Es más sensible para descubrir pequeños pólipos y tumores, entre otras patologías.

El bario es un producto inerte que no se absorbe, es bien tolerado y no causa reacciones adversas. Sin embargo su uso requiere de ciertas precauciones:

- Produce constipación. Es necesario aconsejar a los pacientes que beban mucho líquido luego de los estudios, especialmente si son constipados.
- No está indicado por vía oral cuando se sospecha una obstrucción completa del tránsito digestivo.
- Si existe la presunción de una perforación del tubo digestivo, no debe usarse el bario porque puede producir granulomas peritoneales y adherencias. En estos casos se prefieren los contrastes iódados por vía oral o enema, que se absorben por el peritoneo y no causan adherencias.

Como alternativa al bario, en los casos en que está contraindicado, pueden usarse contrastes iódados especialmente preparados para el tracto digestivo, que no brindan tan buen contraste, pero permiten realizar el examen.

Por el contrario, cuando se sospechan trastornos de la deglución y broncoaspiración (por ej. pacientes con daño neurológico, bebés y ancianos), es preferible el bario al iodo, porque este último produce neumonitis química, mientras que el bario es más inerte.

### Gadolino

El gadolinio es el contraste usado en RM, por vía endovenosa. Es una sustancia paramagnética (son

atraídas por imanes) que puede alterar el campo magnético de los tejidos y aumentar su señal, produciendo realce con tonos claros (blanquecinos o brillantes) cuando se acumula en los vasos, órganos y lesiones.

Luego de su inyección endovenosa se distribuye por el organismo a través del sistema circulatorio y es eliminado mayormente por el riñón. A más irrigación mayor realce. No atraviesa la barrera hematoencefálica, salvo que esté dañada (por ej. accidente cerebrovascular, infecciones, neoplasias, etc.).

El gadolinio es muy bien tolerado y son excepcionales las reacciones adversas. Es de baja osmolaridad, por lo tanto este tipo de reacciones no se producen. Pueden observarse reacciones de tipo anafilactoide, pero son muy raras y las graves son excepcionales (0,001 a 0,01%), con pocos casos informados documentados de muerte directamente vinculada a hipersensibilidad al gadolinio, teniendo en cuenta los millones de dosis administradas en todo el mundo.

Está contraindicado en pacientes con insuficiencia renal, en los que puede producirse un cuadro llamado "fibrosis sistémica nefrogénica", que es muy poco frecuente.

Además de la vía endovenosa, el gadolinio también puede usarse para artrografías con RM, inyectado por vía intraarticular (percutánea).

Para RM, además del gadolinio convencional, hay nuevos gadolinios específicos hepatobiliares. Recientemente se han desarrollado moléculas con gadolinios que permanecen más tiempo en el torrente circulatorio y mejoran las angio-RM.

También hay otros contrastes, como los derivados férricos que son captados por el sistema reticuloendotelial (particularmente por el hígado) y se denominan agentes intracelulares, a diferencia del gadolinio convencional que permanece en el espacio extracelular, igual que el iodo.

### Contrastes para ecografía

Los contrastes ecográficos consisten sobre todo en microburbujas que son muy ecogénicas, lo que las hace visibles con el ultrasonido. Inyectados por vía endovenosa permiten estudiar la perfusión de órganos y tumores. En el hígado, por ejemplo, sirven para caracterizar lesiones focales como tumores hipervasculares, metástasis, etc. También se usan en ecocardiografía y para evaluar estenosis vasculares, mejorando la señal Doppler, incluso cuando el flujo es bajo.

## Exámenes de diagnóstico por imágenes

### Introducción

En este apartado nos referiremos a cada uno de los exámenes por imágenes, analizando de forma breve aspectos técnicos y más detalladamente sus ventajas, sus limitaciones y sus indicaciones generales.

Conviene señalar que las indicaciones están en continua revisión, debido a los permanentes avances de la tecnología, lo que dificulta la enseñanza de algoritmos o protocolos para cada problema clínico, que se deben actualizar periódicamente.

Para la elección de un examen como el más apropiado para un problema clínico, es necesario tener en cuenta muchos aspectos, como la edad del paciente, su estado general, sensibilidad y especificidad del método, riesgos y grado de invasividad del estudio, uso de radiaciones y contrastes, costos y disponibilidad, entre otros aspectos.

Existen diversas guías para la correcta indicación de los exámenes por imágenes, que pueden consultarse y se renuevan en forma periódica. Las más utilizadas son las del Colegio Americano de Radiología (ACR) y las Guías de la Comunidad Europea.

### Radiología convencional y digital

Las radiografías pueden ser de tipo convencional o digital. En el primer caso se usan películas fotográficas y en el segundo detectores electrónicos fotosensibles que digitalizan las imágenes, como ocurre con la fotografía actual.

Progresivamente, la RX convencional está siendo reemplazada por la digital, que tiene varias ventajas:

- Menor dosis de radiación.
- Reduce el error humano y las repeticiones (selección automática de la técnica).
- Evita revelado con químicos potencialmente contaminantes.
- Pueden ser almacenadas en computadoras y analizadas electrónicamente.

Luego de atravesar el cuerpo, los rayos X atenuados actúan sobre los detectores, que transforman el nivel de radiación recibida en energía eléctrica que puede ser cuantificada por computadoras para formar una matriz numérica o digital, que matemáticamente reproduce la anatomía de la región irradiada, asignando diversos tonos de grises a cada píxel.

Los registros pueden ser presentados en película, papel o almacenados en CD, DVD y computadoras para su archivo y comunicación llamados PACS (*Picture Archiving And Communications System*).

### Formación de las imágenes

Cuando los rayos X atraviesan el cuerpo, son atenuados de acuerdo con el número atómico de los distintos componentes que encuentran a su paso, hasta llegar a la película o detector fotosensible.

Las estructuras que tienen mayor número atómico dificultan o impiden su pasaje, como ocurre con los metales, el calcio y los medios de contraste (iodo, bario), son los más radiopacos o densos. Los que contienen aire (por ej. pulmón, intestino) ofrecen poca resistencia al pasaje de los rayos X y son los más radiolúcidos. Entre uno y otro extremo se encuentran las vísceras

sólidas (hígado, bazo, etc.), los músculos, las estructuras con contenido líquido (vejiga, intestino, quistes, etc.) y el tejido adiposo.

Por convención, la mayor densidad se representa con tonos blancos y la menor con tonos negros, con una amplia escala de grises entre ambos (Tabla 1.6).

La RX simple detecta un número limitado de densidades, que de mayor a menor incluyen (Figura 1.2):

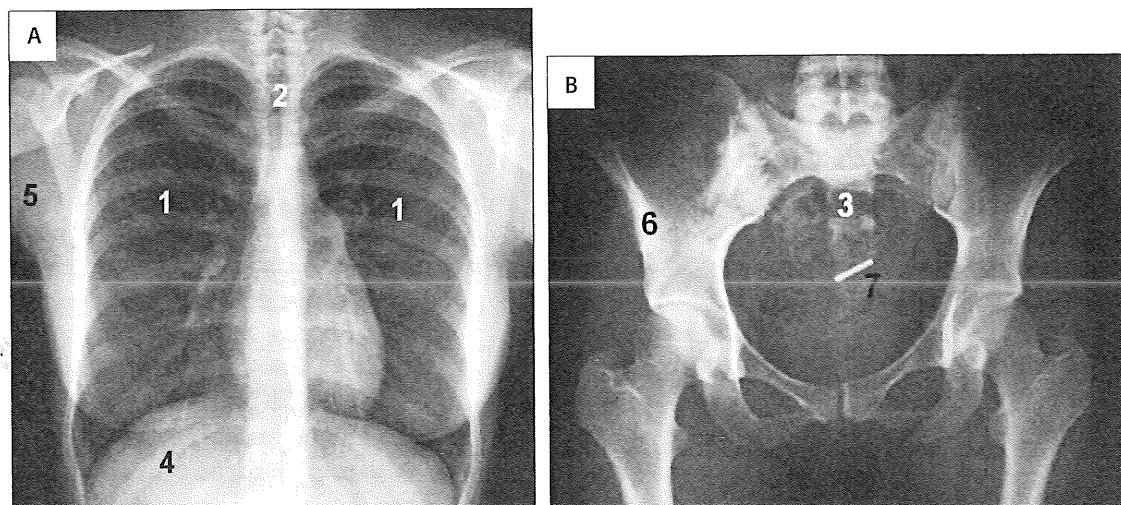
- Metales (clavos quirúrgicos, proyectiles, etc.).
- Contrastes (bario, iodo) y calcio (hueso cortical, litiasis, etc.).
- Órganos (corazón, hígado y bazo, riñones, vejiga, etc.), músculos y líquidos (por ej. derrame pleural).
- Tejido adiposo (por ej. tejido celular subcutáneo, grasa abdominal, lipoma).
- Aire (por ej. pulmones, tracto digestivo).

En cambio, la TC tiene una mayor capacidad para distinguir entre distintas densidades o tejidos, lo que constituye una de sus ventajas.

En TC y en RX son comunes los términos hipertenuante o hiperdenso equivalente a radiopaco, isoatenuante o isodenso para los tonos intermedios y en el otro extremo hipoatenuante o hipodenso equivalente a radiolúcido.

**Tabla 1.6 Escala de grises de la radiología**

Método	Densidades	Tonos en la escala de grises
Radiología	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Metal</li> <li>▪ Contrastes y calcio (hueso)</li> <li>▪ Órganos sólidos, músculos y líquidos</li> <li>▪ Grasa</li> <li>▪ Aire</li> </ul>	<p>Más blanco o claro</p>  <p>Más negro u oscuro</p>



**Figura 1.2 Escala de grises en RX. A RX de tórax frente; B RX de pelvis frente. Densidades radiológicas en orden creciente. Radiolúcido: 1) aire en pulmones; 2) tráquea; 3) intestino. Radiopaco; 4) hígado; 5) músculos; 6) hueso; 7) metal, por ej. un DIU.**

## Radiografía simple

### Ventajas, limitaciones e indicaciones

Las radiografías son ampliamente utilizadas en casi todas las especialidades médicas. El avance de los restantes métodos, como la ECO y la TC, ha relegado el uso de las RX.

### Ventajas

- Método ampliamente disponible y de bajo costo.
- Dosis de radiación limitada.
- Puede ser portátil y realizarse en la cama del paciente (emergencias, cuidados intensivos).
- Brinda una imagen panorámica de un sector del cuerpo.
- Las RX siguen siendo el primer examen a indicar para estudiar el tórax y en particular el pulmón (por ej. neumonía, neumotórax, atelectasia, tumores) y para el esqueleto (por ej. fracturas, artrosis y artritis, tumores).

### Limitaciones

- Superposición de las diversas estructuras anatómicas. Por ejemplo en una RX de tórax de frente se superponen las costillas sobre el pulmón o el corazón

sobre la columna. Por este motivo, es necesario contar con dos incidencias (frente y perfil).

- Detecta un rango limitado de densidades. En una RX, por ejemplo, no es posible distinguir una imagen sólida de una quística con contenido líquido, porque ambas tienen similar densidad.
- Emplea radiaciones ionizantes, con las limitaciones que esto implica.
- Es necesario algún grado de cooperación del paciente, porque el movimiento voluntario o involuntario deteriora la calidad del examen.

### Indicaciones principales

Examen inicial del tórax y del esqueleto.

### Radioscopia o fluoroscopia

#### Formación de las imágenes

La radioscopía permite obtener imágenes dinámicas, en "tiempo real". Se utiliza para los exámenes de estructuras en movimiento como el sistema cardiovascular, tubo digestivo, tracto urinario, movilidad diafragmática y para la guía de cirugías, punciones o colocación de catéteres, principalmente.

Se emplea una pantalla radioscópica, que contiene sustancias fluorescentes que generan luz al ser incididas por los rayos X.

Los equipos actuales tienen detectores digitales de alta sensibilidad y resolución, que mejoran la calidad de la imagen y reducen la dosis de radiación. La información es procesada y puede ser observada a través de monitores de TV y grabada (película, DVD u otros medios).

#### Ventajas, limitaciones e indicaciones

##### Ventajas y limitaciones

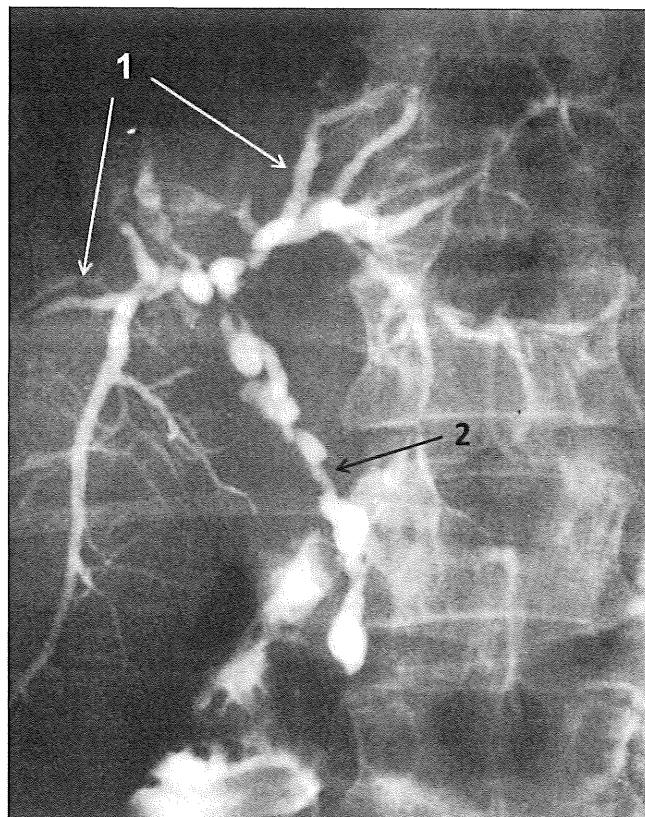
- La radioscopía tiene la ventaja de permitir estudios dinámicos de los órganos en movimiento, pero la desventaja de dosis de radiación superior a la RX simple.
- Hay equipos portátiles llamados arcos en "C", que pueden utilizarse en quirófanos o áreas de cuidados intensivos.

##### Indicaciones

La radioscopía se emplea principalmente para estudios dinámicos de los tractos digestivo y urinario.

- Digestivo: por ej. deglución, esofagograma, seriada gastrroduodenal, reflujo gastroesofágico, tránsito intestinal, enteroclisis, colon por enema simple y doble contraste, examen por colostomía, fistulografías, colangiografías (Figura 1.3).
- Urinarios: por ej. cistouretrografías, pielografías, examen por nefrostomía.

También se utiliza para la guía de procedimientos intervencionistas, como punciones y drenajes, así como



**Figura 1.3** Colangiopancreatografía retrógrada endoscópica bajo radioscopía. Colangitis esclerosante primaria. Múltiples sectores estenosados y dilatados en las vías biliares intrahepática y extrahepática (patrón arrosariado). 1) Vía biliar intrahepática, 2) coledoco.

en cirugía (colangiografía intraoperatoria, prótesis ortopédicas, etc.).

La radioscopía se sigue empleando para estudiar la movilidad del diafragma, aunque se usa cada vez más la ECO, que es portátil (evitando trasladados de enfermos en mal estado), sin radiación y con la ventaja de evaluar también al hígado, el espacio subdiafragmático y la pleura.

### Ecografía o ultrasonido

#### Formación de las imágenes

La ecografía convencional se realiza con equipos provistos de varios transductores, que se apoyan sobre la piel del paciente para la exploración.

Los transductores emiten un haz de ultrasonido que atraviesa el cuerpo. Funciona de manera similar al sonar de un barco, las ondas son conducidas por los elementos acuosos, pero rebotan y producen ecos cuando encuentran estructuras a su paso. Los transductores ecográficos son a la vez emisores y receptores de ondas de ultrasonido y tienen diferentes grados de resolución y de penetración. Como regla general, a mayor profundidad menor resolución.

La información es analizada por una computadora y representada en una pantalla para su estudio y registro posterior en papel, película o formato digital.

Además de la ECO tradicional con transductores de superficie, se ha desarrollado la ecografía intracavaria (por ej. transvaginal, transrectal, transesofágica) que permite un examen muy detallado de las paredes del órgano y los tejidos vecinos, por la proximidad del transductor.

También hay transductores asociados a equipos de endoscopia (ECO-endoscopia) que se utilizan para estudiar la pared del esófago, estómago, duodeno y órganos vecinos (por ej. corazón, páncreas).

La energía exploradora empleada en ECO son las ondas de ultrasonido. Los diversos componentes del cuerpo presentan distinta dificultad a su paso, lo que se denomina "impedancia o resistencia acústica". Las ondas se transmiten sin dificultad a través de los líquidos pero "rebotan" y producen "ecos" cuando se encuentran con estructuras sólidas.

Las áreas con contenido líquido, como vejiga, vesícula biliar, quistes, etc., que dejan pasar sin dificultad el ultrasonido y no producen ecos, se denominan hipoeoicas y son representadas con tonos oscuros en la escala de grises.

Los tejidos sólidos como el hígado y el bazo tienen una ecogenicidad intermedia, son llamadas isoecoicas y se representan con tonalidades grises. El tejido adiposo es más ecogénico que el hígado y los riñones.

Las calcificaciones (por ej. litiasis) producen ecos muy fuertes y "sombra acústica posterior", son llamadas hiperecoicas y se representan con tonos claros (Figura 1.4).

En resumen: a más ecogenicidad, más claro o blanco; a menos ecogenicidad, más oscuro o negro (Tabla 1.7).

### Ventajas, limitaciones e indicaciones

#### Ventajas

- Es un método no invasivo y no emplea radiaciones ni iodo, evitando sus riesgos.
- Es ideal para mujeres en edad fértil y niños.
- Examen fácilmente repetible y rápido.
- Portátil (puede hacerse al lado de la cama o en quirófano).
- De bajo costo y ampliamente disponible.
- No requiere de anestesia.
- Es un estudio dinámico, en "tiempo real".

**Tabla 1.7** Escala de grises de la ecografía

Método	Impedancia acústica	Tonos en la escala de grises
Ecografía	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hueso y aire</li> <li>▪ Grasa</li> <li>▪ Vísceras sólidas</li> <li>▪ Músculos</li> <li>▪ Líquidos</li> </ul>	<p>Más blanco o claro</p> <p>Más negro u oscuro</p> 

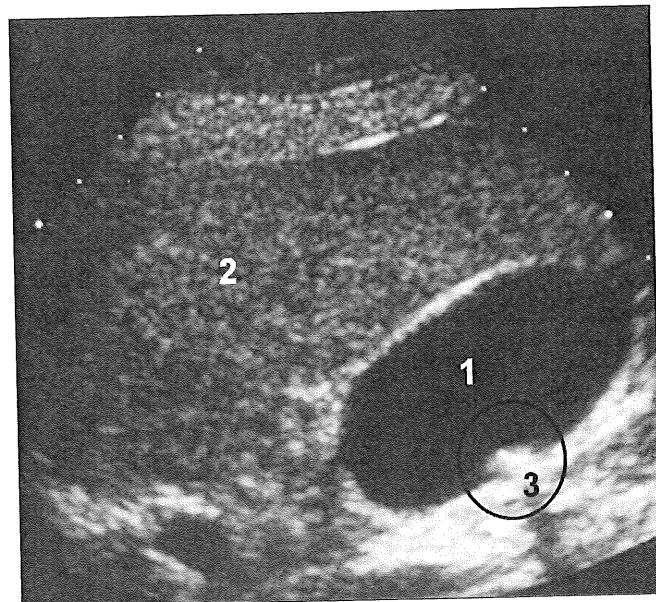
#### Limitaciones

Con todas estas ventajas parecería el estudio "ideal", sin embargo tiene varias limitaciones.

- El ultrasonido no es bien conducido por el aire y el calcio. Puede deducirse que no es el método adecuado para estudiar el pulmón o el hueso cortical.
- El aire en el tubo digestivo (meteorismo) puede dificultar o impedir el estudio del páncreas y otros órganos.
- Brinda una visión segmentaria de una región anatómica, a diferencia de la TC y la RM que muestran el área anatómica completa.
- Es un método muy dependiente del operador.

#### Indicaciones

- La ECO es el primer examen a indicar para el embarazo, el estudio de útero y ovarios, testículos, cuello (tiroides, glándulas salivales, etc.), abdomen y pelvis en general (incluyendo hígado y vías biliares, bazo, riñones, aorta, etc.).
- Es muy útil para descubrir colecciones líquidas (por ej. derrame pleural, pericárdico, ascitis, derrame articular, etc.).



**Figura 1.4** Escala de grises en ecografía. ECO hepatobiliar. Litiasis vesicular (círculo). Se muestran las diferentes ecogenicidades en orden creciente. 1) Hipoeocoico: líquido (bílis); 2) isoechoico: hígado; 3) hiperecoico: calcio (litiasis) con "sombra acústica" posterior.

- También está indicado para el examen de los tejidos blandos (por ej. piel, tejido celular subcutáneo, mamas, músculos, tendones, nervios) y articulaciones.
- El ECO Doppler utiliza el efecto Doppler, que permite detectar la velocidad y el sentido del flujo sanguíneo. Se ha transformado en el primer examen para estudiar de manera no invasiva los vasos accesibles (carótidas yugulares, aorta abdominal y sus ramas, arterias periféricas en los miembros, várices, etc.).
- La ecocardiografía es el examen inicial y de elección para el estudio del corazón.
- En los bebés, mientras está abierta la fontanela, es un excelente método para estudiar el encéfalo.
- La ECO es un método muy utilizado para guiar procedimientos intervencionistas con fines diagnósticos (punción aspiración pleural, punción biopsia de tiroides, etc.) o de tratamiento (guía de drenaje pleural, guía de ablación por radiofrecuencia hepática, etc.).
- Se utiliza rutinariamente durante diversas cirugías y endoscopias.
- Los equipos actuales permiten realizar exámenes tridimensionales estáticos (llamados 3D) o dinámicos (llamados 4D), con mayor detalle anatómico, que se utilizan sobre todo para investigar malformaciones fetales.
- Otro avance es la elastografía mediante ultrasonido, para explorar el grado de elasticidad de los tejidos, que puede alterarse por fibrosis (por ej. cirrosis hepática, carcinoma de mama).
- El uso de contraste ecográfico puede mejorar el estudio de la perfusión de tumores hepáticos, estenosis vasculares y otras patologías estudiadas mediante ECO Doppler.

## Tomografía computarizada

### Formación de las imágenes

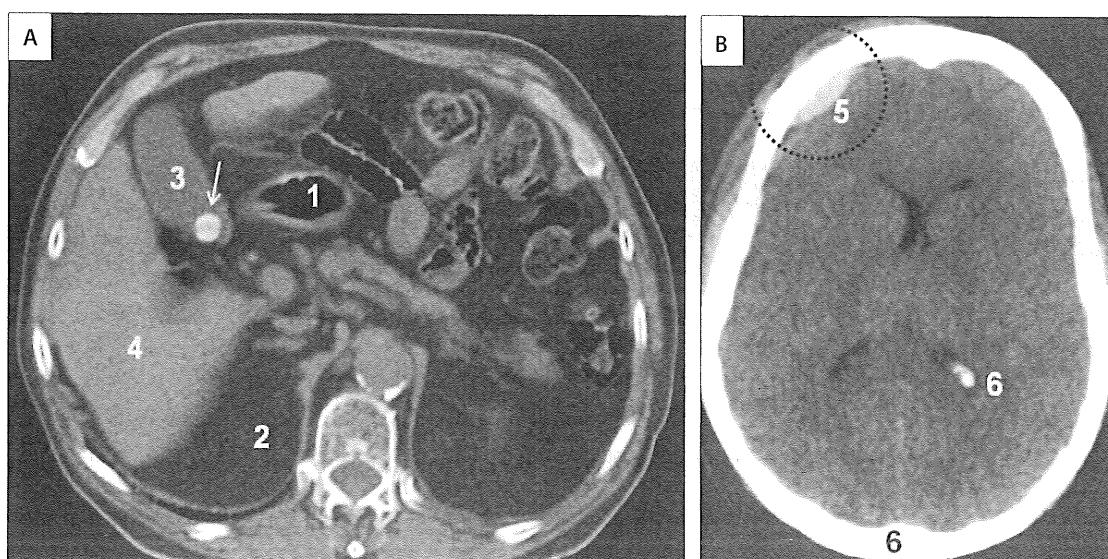
La TC utiliza los rayos X como energía exploradora. Los equipos consisten básicamente en un "anillo" que contiene el tubo de rayos X y los detectores electrónicos ubicados en el lado opuesto, una camilla que se desliza a través del anillo y computadoras para procesar la información y obtener las imágenes.

Luego de atravesar el cuerpo, los rayos X atenuados actúan sobre los detectores, que transforman la radiación recibida en señales eléctricas, que son convertidas por las computadoras en una matriz numérica o digital. La matriz digital está compuesta por miles de píxeles. Cada píxel representa una pequeña porción de la región anatómica explorada. El software asigna a cada píxel (de acuerdo con su valor) diversos tonos, desde el blanco al negro o color y reconstruye la imagen anatómica.

Las imágenes pueden ser observadas en una pantalla, para ser analizadas, medidas y finalmente fotografiadas o guardadas en archivos digitales. La información obtenida reproduce el cuerpo humano en forma de "cortes" o "rodajas". Los cortes más delgados tienen mayor resolución anatómica.

Si bien al principio se utilizó la sigla TAC (tomografía axial computarizada), en la actualidad los equipos pueden realizar cortes en todos los planos, por lo que es más apropiado hablar de TC simplemente.

La TC tiene mayor resolución de contraste que la RX y permite diferenciar mejor las distintas densidades y tejidos, normales y patológicos. Por convención, lo más denso (metal y hueso cortical) se representa con tonos claros (blanco) en la escala de grises y lo menos denso (aire) con tonos oscuros (negro) (Figura 1.5). La densidad se mide usando las unidades Hounsfield (UH) denominadas así en honor a uno



**Figura 1.5 Escala de grises en TC. A** TC de abdomen sin contraste; **B** TC de cerebro sin contraste. Litiasis vesicular (flecha) y hematoma epidural agudo (círculo). Se muestran las distintas densidades en orden creciente: 1) aire; 2) grasa; 3) líquido; 4) órganos sólidos/músculos; 5) sangrado agudo; 6) calcio (hueso y plexo coroideo).

de los inventores de la TC (Sir Godfrey Hounsfield, Premio Nobel).

- +1000 UH equivale a la mayor densidad (hiperdensas o hiperatenuantes) y se representa con tonos claros (por ej. calcio en el hueso, contrastes, litiasis, metales).
- -1000 UH equivale a la menor densidad (hipodensas o hipotenuantes) y se representa con tonos oscuros (por ej. aire pulmonar, vísceras huecas, aire ambiente).
- Alrededor de 0 UH (aproximadamente entre +20 y -20 UH) equivale a una densidad intermedia y se representa con tonos grises. Corresponde a los líquidos con densidad similar al agua (por ej. orina, bilis, líquido cefalorraquídeo, derrame pleural, ascitis). Los músculos y las vísceras sólidas tienen mayor densidad que el agua (aproximadamente entre +40 y +60 UH).
- La grasa tiene menos densidad (aproximadamente entre -40 y -60 UH).
- Conviene advertir que las UH referidas son aproximadas y orientativas, porque en la práctica las densidades de los tejidos se superponen y resultan del promedio (por ej. órganos con grasa y agua, aire y nódulo, etc.) y los límites no son tan precisos.
- Las imágenes con densidad similar a los tejidos sólidos (por ej. músculo) se denominan isodensas o isoatenuantes (Tabla 1.8).

Un caso especial son las hemorragias (particularmente en el endocráneo), que pueden tener distinta densidad, de acuerdo con el momento evolutivo:

- Inicialmente, en la fase aguda son hiperdensas (contienen hierro y proteínas), luego en la fase subaguda se hacen isodensas (se van reabsorbiendo) y tardíamente en la fase crónica se hacen hipodensas (se parecen al agua).
- La transformación del coágulo hace que cambie su densidad tomográfica, de manera similar a como cambia el color de un hematoma en nuestra piel.

### Ventajas, limitaciones e indicaciones

La TC constituyó una revolución en el diagnóstico. Por primera vez era posible observar cortes del cuerpo *in vivo*. Una de las principales fortalezas de la TC es la de reproducir fielmente la anatomía, con gran detalle.

### Ventajas

- No hay superposición de imágenes como ocurre en RX.
- Mayor distinción de densidades (resolución de contraste) que la RX, que permite diferenciar líquidos, sólidos, grasa, etc.
- Incluye todo el cuerpo y no solo un segmento, como ocurre con la ECO.
- Los equipos actuales permiten obtener cortes en cualquier plano o incluso imágenes tridimensionales.
- En un solo estudio es posible analizar todas las estructuras, incluyendo huesos, tejidos blandos, vasos, etc.
- El examen es muy rápido (pocos segundos o minutos), muy apropiado para pacientes en mal estado general.
- A diferencia de la RM, la TC puede examinar con gran detalle los pulmones y el hueso cortical.
- No tiene la dificultad de la claustrofobia o del uso de marcapasos u otros elementos ferromagnéticos, como la RM.
- El uso de contraste iodoado permite realzar vasos, órganos y lesiones con mayor vascularización.
- Tiene la capacidad de realizar angiografías (angi-TC) de manera no invasiva, inyectando el contraste iodoado por vía EV.
- Es un método ampliamente disponible y de costo intermedio.
- Sirve para guiar procedimientos intervencionistas con fines diagnósticos (por ej. punción biopsia de un nódulo pulmonar) o terapéuticos (por ej. drenaje de un absceso abdominal). También se emplea para guiar cirugías.

**Tabla 1.8** Escala de grises de la TC y unidades Hounsfield (HU)

Método	Densidades	Tonos en la escala de grises
Tomografía computarizada	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Metal, contrastes y hueso</li> <li>▪ Hemorragia cerebral en fase aguda</li> <li>▪ Órganos sólidos (hígado, músculos, cerebro, etc.)</li> <li>▪ Hemorragia cerebral en fase subaguda</li> <li>▪ Hemorragia cerebral en fase crónica</li> <li>▪ Líquidos (vejiga, vesícula, LCR, etc.)</li> <li>▪ Grasa</li> <li>▪ Aire (pulmón, víscera hueca, etc.)</li> </ul>	<p>Más blanco o claro</p>  <p>Más negro u oscuro</p>

### Limitaciones

- Las radiaciones contraindican su uso durante el embarazo y lo restringen en niños y jóvenes.
- Requiere el traslado del paciente.
- Si es necesario el contraste iodoado, hay que considerar sus riesgos.

### Indicaciones principales

- Las indicaciones de la TC son muy amplias y abarcan todas las regiones corporales.
- Es el examen inicial y de elección para el estudio del SNC en los pacientes traumatizados, por su rapidez y sensibilidad para detectar hemorragias y fracturas.
- Si bien es apropiada para estudiar tumores cerebrales, malformaciones y otras patologías, ha sido reemplazada por la RM, que tiene mayor sensibilidad y especificidad. Sin embargo, la TC sigue siendo una alternativa útil, a considerar en pacientes claustrofóbicos, con marcapasos u otras causas que contraindiquen la RM.
- En ortopedia, se utiliza sobre todo para evaluar lesiones óseas, como por ejemplo fracturas, tumores, etc.
- Es el examen más rápido y completo para el paciente politraumatizado, porque permite en pocos segundos examinar a un paciente en mal estado que no puede tolerar un examen prolongado y evaluar todo el cuerpo, incluyendo las estructuras óseas y blandas. También lo es para la búsqueda de proyectiles y cuerpos extraños.
- Es el método de elección para estudiar el hueso cortical y las estructuras óseas complejas, como los delicados huesecillos del oído medio, la base del cráneo, etc.
- Luego de la RX simple, es el método de elección para examinar los pulmones y el tórax en su conjunto.
- Es el examen más indicado en oncología para el diagnóstico y seguimiento de tumores, adenopatías y metástasis en todo el cuerpo.
- Luego de la ECO es el método más utilizado en abdomen y pelvis en clínica, cirugía, urología y ginecología.
- Puede detectar colecciones líquidas en abdomen, derrame pleural, derrame pericárdico y otras colecciones líquidas, al igual que la ECO.

### Técnicas de tomografía computarizada

Hoy conviven distintos tipos de equipos y técnicas de TC. Los equipos actuales son los tomógrafos helicoidales multidetectores que permiten realizar todas las técnicas de TC (alta resolución, TC dinámica, angio-TC, endoscopia virtual, 3D, etc.)

### TC convencional

Corresponde a los equipos de las primeras generaciones que realizaban corte por corte y solo en el plano transversal. Esta tecnología está siendo reemplazada por la TC multicorte.

### TC de alta resolución

Se denomina así a las tomografías con cortes muy delgados (aproximadamente 1 mm de espesor). Se utilizan para evaluar estructuras muy pequeñas, sobre todo en pulmón (enfisema, fibrosis, bronquiectasias, etc.) y huesos (examen detallado de oídos y peñascos, base de cráneo, órbitas, etc.).

### TC helicoidal o espiralada

Se realiza con equipos más modernos, que en lugar de realizar "corte por corte" permiten un barrido continuo del paciente. Tiene la gran ventaja de obtener un "volumen anatómico" de información electrónica con una sola apnea, para estudiar una o varias regiones del cuerpo.

A partir de ese volumen de datos electrónicos se reconstruyen imágenes de "rodajas o cortes" en cualquier plano (transaxial, coronal y sagital). También se pueden obtener reconstrucciones bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D).

### TC multicorte o multidetectores

Es la tecnología actual, que perfecciona a la TC helicoidal, con equipos que cuentan con múltiples filas de detectores (2 a 256), en lugar de una sola fila. También hay prototipos con más detectores y nuevos conceptos que emplean detectores digitales planos. A más detectores más cortes simultáneos, exámenes más breves y de mejor resolución anatómica.

Los TC multidetectores hacen cortes en menos de 1 segundo, muy útiles para examinar órganos en movimiento, como los vasos coronarios (latidos cardíacos), los pulmones (movimientos respiratorios) y pacientes críticos (politraumatizados, emergencias quirúrgicas, etc.). Se reduce la necesidad de anestesia. Mientras que un examen convencional duraba varios minutos, un examen helicoidal multidetector se hace en pocos segundos.

### TC dinámica

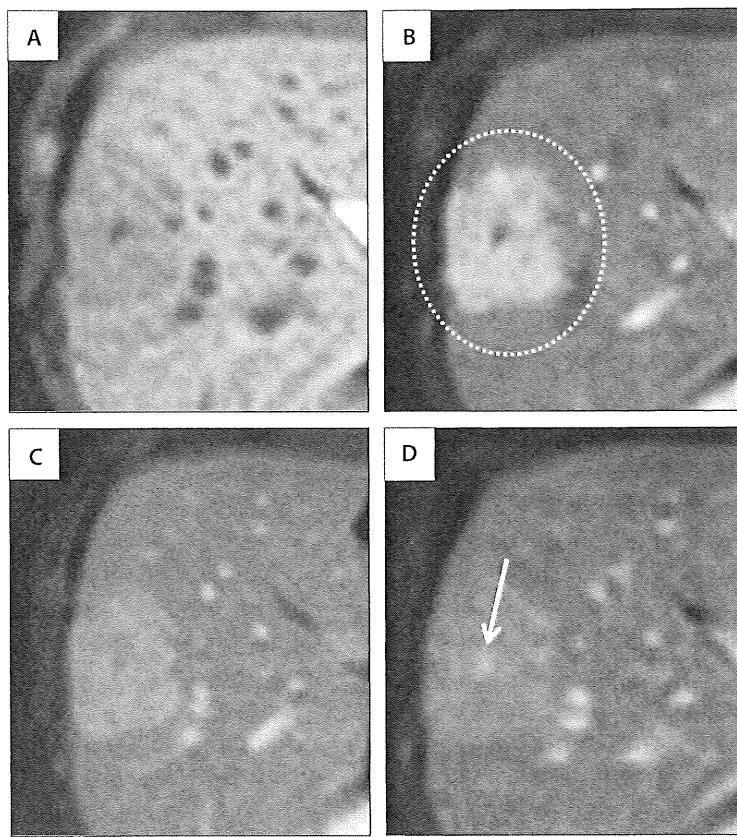
Se denomina así al examen con contraste EV con registros repetidos sobre un área anatómica, primero sin contraste y luego estudiando las fases arterial, portal y tardía (Figura 1.6). Sirve para evaluar la perfusión de las lesiones (por ej. hemangiomas hepáticos) hepatocarcinomas, tumores funcionantes del páncreas, malformaciones vasculares, etc.

### Angiografía por TC o angio-TC

Con contraste EV y técnicas rápidas multicorte se pueden examinar los vasos en fase arterial o venosa, en diversos planos y de manera tridimensional (3D).

### Endoscopia virtual con TC

Se realiza mediante un software que permite "navegar" o "recorrer" de manera virtual la luz de diversos órganos que han sido "barridos" con el tomógrafo.



**Figura 1.6** TC de abdomen con contraste endovenoso trifásico. **A** Sin contraste; **B** fase arterial; **C** fase portal; **D** tardío. Hiperplasia nodular focal.Imagen hipervascularizada en el lóbulo hepático derecho que presenta una cicatriz central con realce tardío (flecha).

Se emplea para examinar la tráquea y los bronquios (“broncoscopia virtual” con TC), el tracto digestivo (“colonoscopia virtual” con TC) y vasos, evaluando de manera no invasiva su luz en busca de tumores, estenosis y compresiones extrínsecas.

La endoscopia por TC no reemplaza a la endoscopia tradicional, que permite una evaluación más completa (por ej. ver el color de la mucosa, obtener material para cultivo, biopsia, etc.), pero es muy útil para estudiar zonas con obstrucción completa, en las que el endoscopio no puede pasar.

### Resonancia magnética

#### Formación de las imágenes

La RM utiliza dos tipos de energía para obtener imágenes: el campo magnético y la radiofrecuencia. El campo magnético es provisto por un poderoso imán y las ondas de radiofrecuencia (similares a las ondas de radio FM) son emitidas y recibidas por bobinas o antenas del equipo.

A mayor potencia de campo magnético mayor señal, lo que se traduce en mejor resolución, menor tiempo de examen o ambos. Los equipos más utilizados actualmente son los de 1,5 T (Tesla: unidad de potencia del campo magnético), pero hay equipos de 0,23 T (como los abiertos) y de 3,0 T o más, de uso clínico y experimental.

El campo magnético es una condición necesaria pero no suficiente para obtener imágenes. Para evaluar los tejidos, es necesario aplicar ondas de radiofrecuencia que producen una carga energética adicional en los átomos o protones de hidrógeno del cuerpo. Luego de este estímulo, estos átomos emiten energía en forma de ondas de radiofrecuencia, que contiene información sobre los tejidos explorados y que son captadas por las “bobinas-antenas” del equipo.

La radiofrecuencia emitida por los tejidos es transformada por el equipo en señales eléctricas y convertida en una matriz numérica digital, constituida por numerosos píxeles. Con esta información se pueden obtener imágenes, de manera similar a lo que ocurre con la TC y otros métodos.

Para uso clínico se emplea la resonancia de hidrógeno (protón H), que está presente en la mayoría de los tejidos, sobre todo formando parte del agua y la grasa.

- A mayor cantidad de hidrógeno en un tejido se obtiene mayor señal (señal hiperintensa o hiperseñal) y se representa con tonos claros o blancos en la escala de grises.
- A menor contenido de hidrógeno se obtiene menor señal (señal hipointensa o hiposeñal) y se representa por tonos oscuros o negros en la escala.
- Entre ambos extremos hay una amplia escala de grises, dependiendo del contenido de agua, grasa, aire

u otros componentes tisulares, que contienen más o menos hidrógeno.

A diferencia de los otros métodos donde solo hay una escala de grises y cada estructura siempre tiene el mismo tono (como ocurre en RX, ECO y TC), en RM de acuerdo con la técnica empleada, un mismo órgano o tejido puede tener diversos tonos. Así, por ejemplo el agua puede verse blanca, gris o negra, dependiendo de la técnica.

Esta característica dificulta un poco la interpretación, pero también constituye una ventaja para distinguir los tejidos. Es posible “resaltar” o “suprimir” el agua, la grasa, el flujo sanguíneo, lo que brinda más información que la obtenida con los métodos tradicionales, como la ECO y la TC.

En RM hay dos técnicas básicas que se denominan T1 (tiempo de relajación longitudinal), que evalúa la relación de los protones de hidrógeno con el medio que los rodea (*spin-lattice*) y T2 (tiempo de relajación transversa), que evalúa la relación de los protones de hidrógeno entre sí (*spin-spin*).

Con las técnicas que estudian el T1 el agua es oscura y la grasa es clara; con las técnicas que estudian el T2, el agua es clara y la grasa es gris claro. Las estructuras con mayor contenido acuoso (LCR, orina, líquido intestinal, etc.) tomarán estos tonos, de acuerdo con la técnica empleada. El aire y el calcio, por su bajo contenido de H, tienen muy baja señal; son oscuros en todas las técnicas.

Los órganos con alto contenido de aire (pulmones) o de calcio (hueso cortical, litiasis) no son los más indicados para ser estudiados por RM; en cambio, los órganos con alto contenido acuoso o adiposo (cerebro, columna, articulaciones, médula ósea, abdomen, etc.) son muy apropiados para la RM.

### Ventajas, limitaciones e indicaciones

#### Ventajas

- No utiliza radiaciones ionizantes. Puede ser empleada en mujeres embarazadas y para el estudio de fetos y niños.
- Puede obtener cortes en todos los planos.
- Se emplea el gadolinio, que es un mejor tolerado que el iodo.
- La mayoría de los exámenes pueden realizarse sin inyectar contraste.

#### Limitaciones

- Debido a los potentes imanes está contraindicada en pacientes con implantes metálicos y electrónicos (marcapasos cardíacos, desfibriladores, estimuladores medulares y auditivos, etc.).
- Las prótesis de cadera, los clavos óseos y las prótesis de titanio no son una contraindicación, aunque producen artefactos que afectan la calidad de las imágenes, como ocurre en TC.

- Es necesario tomar precauciones con los elementos metálicos ferromagnéticos como clips antiguos de aneurismas y otros implantes.
- Los cuerpos extraños oculares (por ej. industria metalúrgica, mecánica, construcción) son una contraindicación.
- En casos de duda se debe consultar al radiólogo o recurrir a páginas web que indican la viabilidad o riesgo de numerosos elementos, según la marca y modelo (por ej. [www.mrisafety.com](http://www.mrisafety.com)).
- Otra limitación de la RM es la claustrofobia que afecta aproximadamente al 10% de la población. Hay pacientes que no pueden tolerar el examen. En estos casos se puede recurrir a los equipos abiertos, que tienen menos potencia y resolución, o realizar el examen bajo sedación o anestesia. Otra alternativa es considerar el reemplazo del examen por una TC u otro método.
- También suele ser necesario recurrir a la anestesia en los niños de menor edad.
- Los estudios son más prolongados. Mientras que una TC se realiza en pocos segundos o minutos, una RM en general requiere de 15 a 30 minutos para el estudio de una región anatómica (por ejemplo, cabeza).
- Es necesario que el paciente esté en condiciones de cooperar, permaneciendo quieto, y de tolerar el decúbito dorsal, para evitar imágenes de mala calidad por artefactos producidos por el movimiento.

Por estos motivos, la RM no es el estudio más apropiado para las emergencias o pacientes en mal estado general, que pueden ser examinados con TC mucho más rápidamente.

Asimismo, dentro de la sala del equipo no pueden ingresar elementos metálicos como camillas, tubos de oxígeno, martillos, pinzas, respiradores u otros elementos metálicos o electrónicos, con riesgo de un accidente grave. Este es otro motivo que limita su uso en pacientes críticos.

#### Indicaciones

- Es el método de elección por su mayor sensibilidad y especificidad para estudiar el encéfalo, la médula espinal y el conducto raquídeo. Ha desplazado a la TC para la mayoría de los diagnósticos en estos sectores.
- Es superior para la búsqueda de isquemia e infartos, enfermedades de la sustancia blanca, tumores, malformaciones, etc.
- La TC sigue siendo superior para la búsqueda de calcificaciones, proyectiles y lesiones óseas.
- La RM es prácticamente el único método que permite evaluar la médula ósea, aunque no es tan adecuada para estudiar el hueso cortical (calcio).
- A diferencia de la RX y la TC, la RM muestra con gran detalle los ligamentos y tendones, membrana y líquido sinovial, meniscos, cartílago articular y músculos.

- Por todas estas ventajas es el examen más sensible y específico para examinar las articulaciones (rodilla, hombro, columna, etc.).
- Es un método alternativo a la ECO y la TC para el estudio de los órganos abdominales y pélvicos (por ej. hígado, páncreas, vías biliares, riñones, glándulas suprarrenales, bazo; retroperitoneo, órganos genitales femeninos y masculinos, etc.). Se emplea de manera creciente para caracterizar lesiones dudosas, detectadas por ECO o por TC.
- Por sus ventajas y la amplitud de sus indicaciones, su sensibilidad y especificidad, la RM es un método en permanente ascenso, con un uso creciente.
- El examen con gadolinio está indicado cuando se sospechan tumores, procesos infecciosos y para estudiar los vasos y la vascularización de las lesiones.

#### Técnicas de resonancia magnética

Al valor diagnóstico de la RM para producir imágenes anatómicas con gran resolución y calidad se suma su capacidad para producir imágenes funcionales o moleculares. Junto con el PET/TC y la MN, son las técnicas que brindan mayor información funcional.

Si bien puede estudiar prácticamente todas las regiones y órganos, se utiliza sobre todo para el sistema nervioso central, el esqueleto, las articulaciones y el abdomen.

Las técnicas T1 y T2 son las más usadas de manera rutinaria en RM, pero hay muchas otras que es necesario conocer.

#### Tiempo de relajación tisular T1 o simplemente T1

Brindan mejor detalle anatómico. Con esta técnica se utiliza el gadolinio como contraste.

#### Tiempo de relajación tisular T2 o simplemente T2

Se usa para detectar lesiones que pueden pasar desapercibidas con T1. Diferencia mejor los tejidos enfermos de los sanos.

#### Técnicas de supresión grasa

A diferencia de otros métodos, la RM tiene la capacidad técnica de "suprimir o anular" (oscurecer) la señal de ciertos componentes tisulares, como la grasa.

Con las técnicas de supresión grasa (por ej. STIR, etc.) el tejido adiposo se "oscurece" (normalmente tiene tonos claros) (Figura 1.7), lo que ayuda a confirmar el componente adiposo de varios tumores (por ej. lipomas, liposarcomas, teratomas, adenomas suprarrenales, angiomiolipomas renales, etc.).

También facilita la detección de otras neoplasias primarias y secundarias, edema de la médula ósea u otras alteraciones, que no serían evidentes con las técnicas convencionales.

#### Técnica FLAIR

Se emplea para "suprimir" (oscurecer) la señal del líquido cefalorraquídeo (LCR) y resaltar el contenido acuoso de las lesiones. Facilita mucho la detección de focos isquémicos, enfermedades desmielinizantes, edema tumoral, etc.

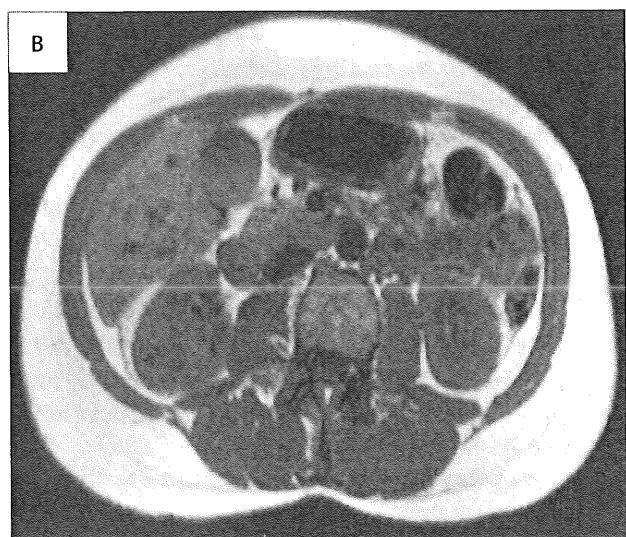
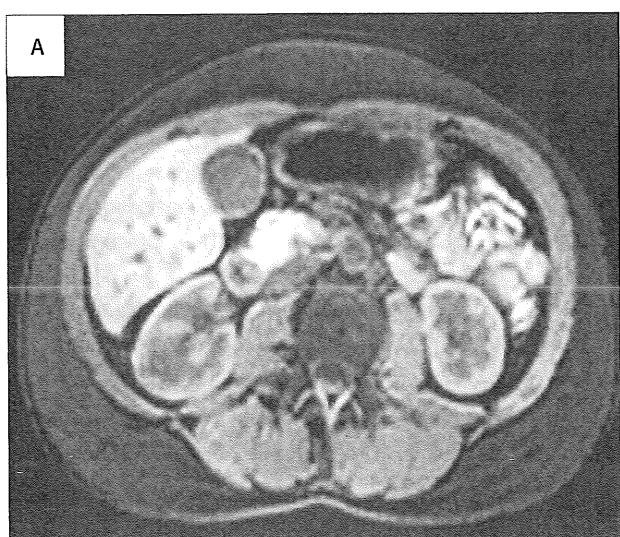
#### Angio-resonancia

Las técnicas de angio-RM detectan el flujo sanguíneo y lo diferencian de los tejidos sin flujo o "estáticos". Puede diferenciar el flujo rápido para estudiar las arterias (Figura 1.8) y el flujo lento para las venas.

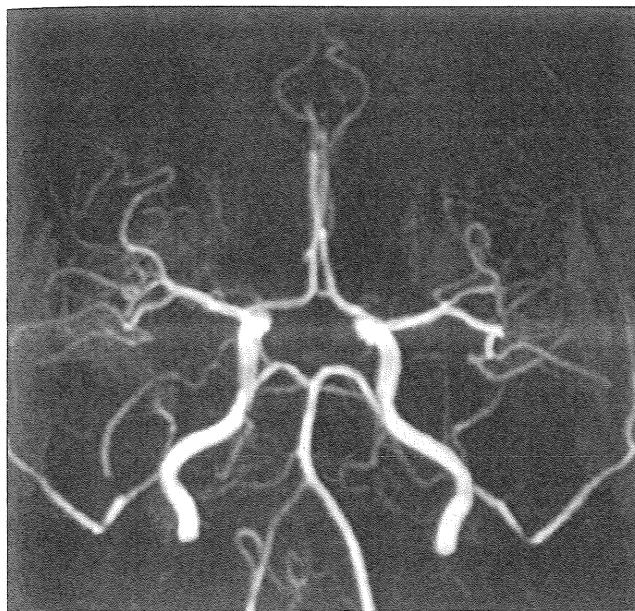
En el encéfalo, generalmente se realizan sin contraste EV; para el resto del cuerpo se obtienen mejores resultados con gadolinio.

Las imágenes de angio-RM tienen una adecuada resolución anatómica, pero no alcanzan la calidad y el detalle de la angiografía por cateterismo. Permiten evaluar los grandes vasos y sus ramas primarias, pero no alcanzan a demostrar las ramas más pequeñas.

Junto con el ECO Doppler y la angio-TC constituyen alternativas menos invasivas para el estudio del sistema vascular.



**Figura 1.7** Técnica de supresión grasa. **A** RM de abdomen T1; **B** T1 supresión grasa. La grasa toma un tono oscuro (hipointenso).



**Figura 1.8** Angio-RM intracranal sin contraste. Mediante el registro del flujo vascular rápido se obtienen imágenes en tiempos arteriales del polígono de Willis y sus ramas principales.

#### Cardio-resonancia

La RM cardíaca incluye un grupo de técnicas para examinar las cuatro cavidades, válvulas, miocardio y perfusión, entre otros parámetros.

#### Colangiopancreatografía por resonancia (CPRM) o colangio-RM

Hay técnicas diseñadas para identificar los líquidos con flujo muy lento como la bilis (colangio-RM), la orina (uro-RM) y el LCR (flujo de LCR).

La colangio-RM permite estudiar las vías biliares intrahepática y extrahepática y el conducto pancreático principal (Wirsung). Es muy útil para el diagnóstico de litiasis, tumores, colangitis y otras patologías.

Luego de la ECO, en caso de dudas se recurre a la colangio-RM. Conviene aclarar que para el examen de la vesícula biliar la ECO sigue siendo mejor, pero la colangio-RM es superior para el colédoco, especialmente en su porción terminal.

Prácticamente ha reemplazado para fines diagnósticos a la colangiografía ascendente o retrógrada por vía endoscópica, que es un estudio de excelente resolución anatómica, pero invasivo y no exento de complicaciones (por ej. colangitis, pancreatitis).

#### Uro-resonancia

Mediante una técnica similar de “flujo muy lento”, la uro-RM muestra la orina y permite evaluar el sistema pielocalicial, los uréteres y la vejiga. Junto con la ECO y la uro-TC han desplazado progresivamente a la tradicional pielografía EV.

La uro-RM puede mostrar litiasis urinarias como defectos de relleno dentro de las vías urinarias, pero no es el método más adecuado. El más sensible para

detectar litiasis calcificadas es la uro-TC sin contraste, que supera incluso a la ECO y la RX simple.

#### Flujo de LCR

El LCR también fluye muy lentamente y puede ser demostrado en el sistema ventricular, cisternas y en el acueducto de Silvio, para demostrar obstrucciones causadas por tumores u otras causas de hidrocefalia.

En el conducto raquídeo, las técnicas de RM logran un “efecto mielográfico” que mejora el detalle de las raíces neurales.

#### Técnica de difusión o RM-difusión

La técnica de difusión o DWI (*diffusion-weighted imaging*) permite estudiar el movimiento o difusión de las moléculas de agua dentro del organismo. No es necesario utilizar contraste externo; el agua actúa como “contraste natural”.

Normalmente el agua (que contiene átomos de hidrógeno) difunde por los compartimientos intracelular y extracelular mediante diversos mecanismos (por ej. movimiento browniano, siguiendo al sodio, unida a proteínas, etc.).

En el encéfalo, cuando se produce isquemia, comienzan a fallar los mecanismos de la membrana celular y el agua se acumula dentro de las células. Se produce edema citotóxico con “restricción de la difusión” o “estancamiento del agua”, que puede ser detectado.

La RM de cerebro con técnica de difusión es el método más sensible y precoz para detectar una isquemia cerebral. Es de gran importancia para iniciar de inmediato el tratamiento y evitar o reducir las graves secuelas neurológicas.

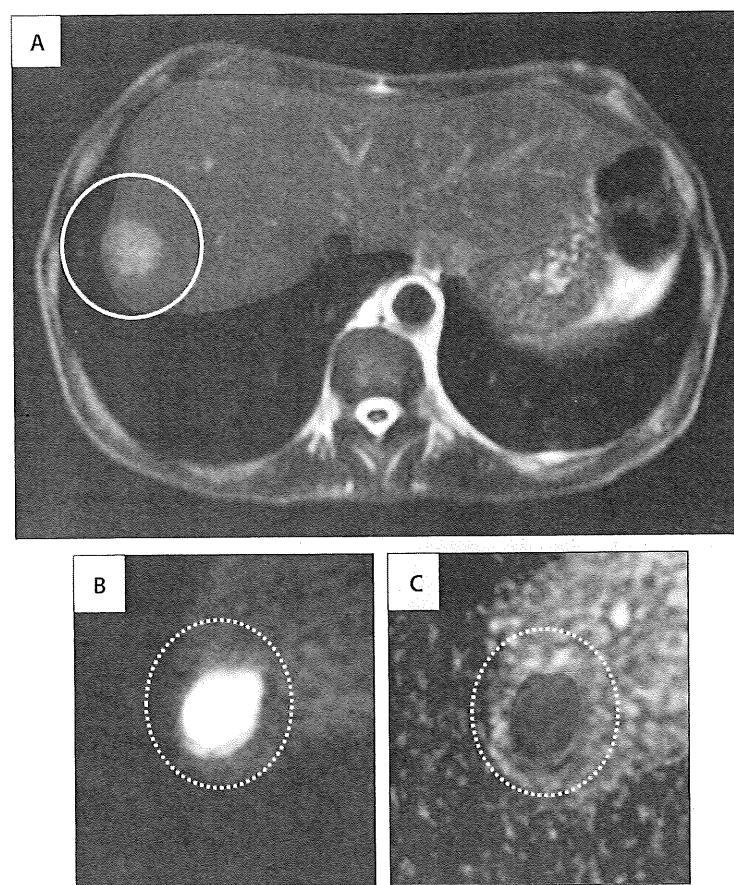
También es útil para demostrar la restricción o estancamiento de agua en pacientes con encefalitis, abscesos y otros procesos inflamatorios, difíciles de diagnosticar con las técnicas convencionales.

En el resto del cuerpo, se ha descubierto que en la mayoría de los tumores (que son tejidos con alta celulardad) el agua tiene restringida su difusión, por reducción del espacio extracelular o intersticial. El examen con RM de hígado, riñones, páncreas y otros órganos con técnica de difusión permite identificar tumores como áreas con restricción de la difusión. A mayor cantidad de células, más agua acumulada (Figura 1.9).

Actualmente se utiliza la técnica de difusión combinada con la supresión grasa, para evaluar todo el cuerpo en busca de metástasis (*whole body DWI*).

Hay tres tipos de técnicas que sirven para estudiar la velocidad de difusión del agua, que son la técnica de difusión propiamente dicha (DWI), el coeficiente de difusión aparente (ADC o *apparent diffusion coefficient*) y el tensor de difusión. Se emplean para evaluar de manera cuantitativa la alteración de la difusión.

Las zonas patológicas con restricción de la difusión (“estancamiento del agua”) se identifican como áreas hiperintensas (claras) con la técnica de difusión e hipointensas (oscuras) con ADC.



**Figura 1.9** Técnica de difusión. Metástasis hepática. **A** RM de abdomen T2. Nódulo en lóbulo hepático derecho (círculo). **B** Difusión. **C** ADC map. La lesión muestra fenómeno de restricción de la difusión (clara en difusión y oscura en ADC) compatible con alta celularidad.

La técnica de difusión-ADC es un muy buen ejemplo de la aplicación de imágenes moleculares o funcionales con RM.

#### Tensor de la difusión y tractografía

Un tensor o vector indica la dirección e intensidad de un proceso. El tensor de la difusión acuosa estudia la dirección que siguen las moléculas de agua a lo largo de los axones de la sustancia blanca. Esta técnica se denomina tractografía y se utiliza para estudiar *in vivo* los tractos o haces de conducción nerviosa (por ej. haz corticoespinal, haz corticonuclear, etc.).

Se emplea previo a la cirugía para identificar la relación entre los tractos principales y un tumor u otras lesiones.

#### Espectroscopia por RM

La espectroscopía por RM permite analizar la composición química de una región anatómica *in vivo*. De acuerdo con el contenido de átomos o protones de hidrógeno, puede identificar las distintas moléculas o metabolitos presentes y cuantificarlos.

Los resultados se expresan mediante trazados cuyos picos indican la cantidad de cada metabolito. También pueden producirse imágenes o "mapas químicos".

La espectroscopía por RM se utiliza para examinar el cerebro y en menor medida otros órganos (por ej. próstata, músculos, hígado).

En el encéfalo, los principales metabolitos son el N-acetilaspartato (NAA), la colina (Cho), la creatina (Cr), el lactato (Lac), la alanina (Ala) y el mioinositol (Myo).

- El N-acetilaspartato (NAA) es un marcador neuronal. Disminuye en los tumores gliales (que no tienen neuronas) y en las metástasis.
- La colina (Cho) es un marcador de proliferación de la membrana celular. Aumenta en los tumores, que producen más células y membranas.
- El lactato (Lac) indica necrosis. Aumentado en los infartos y áreas de necrosis de los tumores.

La espectroscopía de cerebro ayuda a diferenciar los tumores de las lesiones seudotumorales.

#### Resonancia magnética funcional

La RM funcional estudia el consumo de oxígeno de las áreas funcionales del cerebro, que varían de acuerdo con su estado de reposo o actividad. Se emplea la técnica BOLD (*blood oxygen level dependent*). Es otro ejemplo de imagen molecular o funcional. No es necesario utilizar contrastes externos.

Cuando se activa un área funcional del cerebro (por ej. el área del lenguaje) se produce un incremento del flujo sanguíneo, de la perfusión y del consumo de O<sub>2</sub>. A mayor actividad mayor formación de deoxihemoglobina, que es paramagnética y puede ser detectada con la RM.

Para lograr la activación que "hace visibles" las áreas funcionales, se utilizan estímulos repetitivos motores (por ej. mover el pulgar), sensitivos (por ej. percibir calor) y sensoriales (por ej. leer, escuchar, etc.). Las "zonas activadas" se hacen hiperintensas (claras) y se diferencian con una escala de colores del resto del cerebro.

Se utiliza como mapeo quirúrgico para preservar zonas elocuentes (por ej. áreas motoras, del lenguaje), identificar la lateralidad del lenguaje, estudiar alteraciones cognitivas, etc.

Esta técnica no invasiva es una herramienta de gran valor para la investigación en neurología y psiquiatría.

### Perfusión sanguínea

Se puede estudiar con RM y también con TC y MN. Se utiliza sobre todo para evaluar el volumen de sangre que llega al lecho capilar en una unidad de tiempo, particularmente en el cerebro y corazón.

La perfusión tisular está disminuida en casos de isquemia e infarto y aumentada en muchos tumores.

Luego de una imagen basal sin contraste, se realizan múltiples registros sucesivos ("scan o barrido dinámico") luego de injectado el contraste. Con esta información se producen curvas para graficar el flujo sanguíneo en el territorio estudiado.

En un área de infarto cerebral o cardíaco, el examen de la perfusión permite establecer un pronóstico sobre los tejidos recuperables ("viables") y los que tienen daños irreversibles ("no viables").

La perfusión cerebral se utiliza junto con la espectroscopía para diferenciar tumores primarios y metástasis (hipervasculizados) de lesiones seudotumorales (por ej. zonas de radionecrosis, etc.) que no tienen aumento de la perfusión.

### Estudio de la angiogénesis

Se define a la angiogénesis como la capacidad de los tejidos, normales y patológicos, de formar nuevos vasos. Un ejemplo de angiogénesis fisiológica es el proceso de curación de los tejidos luego de recibir heridas. Durante su crecimiento muchos tumores producen factores que estimulan la angiogénesis, para proveerse de mayor flujo sanguíneo y nutrientes.

Las técnicas de RM y TC que estudian la perfusión indirectamente informan sobre la angiogénesis, pues ambos parámetros, si bien son diferentes, se encuentran vinculados. Esta información tiene valor en oncología; actualmente se están desarrollando drogas antiangiogénicas, para combatir el crecimiento tumoral.

### Angiografía por cateterismo

#### Formación de las imágenes

La angiografía por cateterismo utiliza los rayos X como energía exploradora. Sigue siendo el examen de referencia para estudiar el sistema cardiovascular, con fines diagnósticos y terapéuticos (intervencionismo endovascular).

Con anestesia local se introduce un catéter en una arteria (generalmente la femoral o la humeral) para acceder a la aorta y a partir de ella llegar a cualquier arteria o al corazón. Bajo control radioscópico se traslada la punta del catéter hasta la región de interés y se inyecta el contraste iodado para opacar los vasos y efectuar los registros.

También por punción y cateterismo puede accederse al sistema venoso para realizar flebografías de distintos territorios.

Los exámenes se realizan bajo control radioscópico en angiografos digitales diseñados especialmente, con un arco en "C" que puede girar en diversas direcciones para obtener imágenes de frente, perfil y oblicuas de los vasos, sin tener que mover al paciente.

#### Ventajas, limitaciones e indicaciones

#### Ventajas y limitaciones

Con el progreso de los métodos angiográficos no invasivos como ECO Doppler, angio-TC y angio-RM se han reducido las indicaciones de la angiografía por cateterismo con fines diagnósticos. No obstante, la angiografía sigue siendo el método de referencia o patrón oro (*gold standard*) en la patología vascular y además permite realizar tratamientos endovasculares.

El intervencionismo endovascular se emplea de manera creciente y ha reemplazado parcialmente a la cirugía cardiovascular tradicional para tratar estenosis arteriales mediante balón (angioplastia) y colocación de *stent*, embolizar arterias y aneurismas para evitar sangrados, tratar obstrucciones por trombos mediante fibrinólisis, colocar filtros en la vena cava, entre otros procedimientos.

Sin embargo, la angiografía es un método invasivo, con potencial morbilidad y mortalidad (por ej. hematoma en el sitio de punción, infecciones, accidente cerebrovascular, arritmias, etc.) Es un método de mayor costo y que no está disponible en todos los centros. Emplea contraste iodado y radiaciones.

#### Indicaciones principales

Se utiliza para identificar estenosis y oclusiones arteriales, aneurismas, malformaciones vasculares y tumores hipervasculizados.

Los procedimientos angiográficos más frecuentes incluyen:

- Coronariografía.
- Angiografía de los vasos del cuello y endocráneo (llamada "angiografía de los cuatro vasos") que incluye ambas carótidas y vertebrales.
- Aortografía.
- Angiografía de vasos periféricos (miembros inferiores y superiores).
- Angiografía selectiva de tumores hipervasculizados.

## Intervencionismo

Se denomina radiología intervencionista al uso de las imágenes para guía de procedimientos diagnósticos (por ej. punción biopsia de nódulo pulmonar guiada por TC, punción diagnóstica de un derrame pleural guiada por ECO) o terapéuticos (por ej. drenaje de absceso hepático guiado por ECO o TC, angioplastia con balón y *stenting*, etc.).

Los métodos más utilizados son la ECO, la TC y la radioscopía. En el Capítulo 10, Intervencionismo, trataremos con mayor detalle estos temas.

## Medicina nuclear

### Formación de las imágenes

La radiactividad fue descubierta por Henri Becquerel en 1896 y luego fue estudiada por Madame Curie (ambos Premio Nobel).

La MN se basa en el uso de radiotrazadores o radiofármacos constituidos por un elemento radiactivo o radioisótopo (por ej. Tecnecio-99, Galio-67, Talio-201, etc.) unido o no a una "molécula portadora".

La vida media de la actividad radiactiva es muy variable (desde minutos hasta días).

Los radiotrazadores permiten seguir una molécula dentro del organismo y determinar dónde se fija según su afinidad por los receptores celulares, metabolismo, flujo sanguíneo, etc. Por ejemplo, el Iodo-131 es captado por el tejido tiroideo y se emplea en cáncer de tiroides; el difosfonato marcado con Tecnecio-99 se fija en el esqueleto y es útil para detectar metástasis óseas. De acuerdo con el grado de acumulación del radiotrazador se habla de áreas hipercaptantes o "calientes", isocaptantes (similares a la captación fisiológica del tejido vecino) e hipocaptantes o "frías".

Los equipos de MN poseen detectores muy sensibles (cristales de centelleo) para identificar las partículas radiactivas. Esta información procesada mediante computadoras permite obtener imágenes diagnósticas.

Actualmente conviven varias tecnologías en MN, entre las que se incluyen la cámara gamma, el SPECT y el PET/TC.

Las cámaras gamma tienen uno o varios cabezales detectores con cristales de centelleo. Se utilizan de manera rutinaria para centellograma óseo, cardíaco, tiroideo, renograma, etc.

Los equipos de SPECT (*Single Photon Emission Computed Tomography*) son en esencia cámaras gamma con cortes tomográficos, lo que mejora la detección de algunas lesiones pequeñas. Actualmente hay equipos de SPECT híbridos, unidos a tomógrafos computarizados, que unen la información funcional de la MN con la anatómica de la TC.

Tanto las cámaras gamma como el SPECT utilizan radiotrazadores convencionales de fotones simples.

El PET/TC (*Positron Emission Tomography*) es una tecnología distinta, que utiliza radiotrazadores

emisores de positrones (de fotones dobles) y tiene mayor potencia y resolución que los otros métodos de MN. Por su importancia nos ocuparemos de este método en un apartado especial.

El futuro de la MN está muy vinculado a las imágenes moleculares, con el desarrollo de nuevos radiotrazadores que permiten comprender mejor la fisiopatología a nivel bioquímico, *in vivo*. Son muy importantes para el diagnóstico y tratamiento del cáncer.

### Ventajas, limitaciones e indicaciones

#### Ventajas

- Aportan información funcional que no se obtiene con los métodos predominantemente morfológicos como son la RX, la ECO y la TC.
- Constituyen un pilar de las imágenes moleculares o funcionales.
- Permiten cuantificar fenómenos fisiológicos (por ej. excreción renal, perfusión, etc.).
- En varios estudios se incluye el cuerpo completo (por ej. centellograma óseo, etc.), con claras ventajas en oncología, para buscar metástasis que podrían pasar desapercibidas al examinar una sola región anatómica.

#### Limitaciones

- Los exámenes de MN tienen menor resolución anatómica que la TC y la RM, con limitaciones para la localización anatómica precisa de algunas lesiones.
- Por este motivo se está recurriendo a la fusión de imágenes (por ej. SPECT/TC y PET/TC), para obtener a la vez la información funcional y el detalle anatómico.
- Los radiotrazadores emiten radiaciones ionizantes. Están contraindicados durante el embarazo y deben utilizarse con precaución en mujeres en edad fértil y niños.

#### Indicaciones principales

- Los estudios más frecuentes son el centellograma óseo (*bone scan*), los exámenes de perfusión y viabilidad miocárdica y el *scan* de tiroides.
- El centellograma óseo se realiza con pirofosfato o difosfonato marcado con Tecnecio-99 (*Tc-99*).
  - Está indicado para la detección de metástasis óseas y tumores óseos primarios.
  - También para evaluar osteomielitis, necrosis avascular, fracturas ocultas y otras patologías esqueléticas.
  - Es muy sensible para la búsqueda de metástasis, pero poco específico porque los focos hipercaptantes pueden ser falsos positivos (por ej. fracturas, artrosis, artritis, etc.).
  - Por eso se dice que "vale más si es negativo", porque es muy raro que haya patología ósea con un centellograma normal o negativo.

- Para evaluar la perfusión y la viabilidad cardíaca en pacientes con sospecha de isquemia o infarto se utiliza el Tecnecio-99 MIBI y el Talió-201 (Tl-201) con o sin apremio farmacológico o con ejercicio.
- Para estudiar el tromboembolismo pulmonar se utiliza la albúmina marcada con Tecnecio-99 por vía EV.
  - Se examinan la perfusión (Q) y la ventilación (V). Las zonas con embolismo muestran menor perfusión con ventilación conservada. Esta falta de coincidencia (*mismatch*) es altamente significativa.
  - El examen debe ser interpretado junto a una RX de tórax para evitar errores por bullas u otras patologías.
  - Actualmente los avances de la angio-TC permiten detectar con similar sensibilidad y especificidad el tromboembolismo pulmonar.
- En clínica y gastroenterología, se emplean exámenes de MN para la localizar un sangrado oculto en el tracto digestivo, identificar un divertículo de Meckel, estudiar el vaciamiento gástrico y el reflujo gastroesofágico, etc.
- En clínica, oncología y traumatología se utiliza mucho el centellograma óseo para identificar la causa de dolor, metástasis, osteomielitis, etc.
- En urología y nefrología se recurre a la MN para evaluar la perfusión y excreción renal diferenciada (renograma), la torsión testicular y estudiar la vejiga y el reflujo vesicoureteral (cistograma).
- En endocrinología se utiliza ampliamente:
  - Tiroides con I-131 (funcional y anatómico) o Tecnecio-99 (anatómico).
  - Adenomas paratiroides con sestamibi Tecnecio-99.

- Feocromocitomas (metabolizan catecolaminas) con MIBG Iodo-131.
- Tumores neuroendocrinos con receptores de somatostatina con octreotide Indio-111.

## Tomografía por emisión de positrones o PET/TC

### Formación de las imágenes

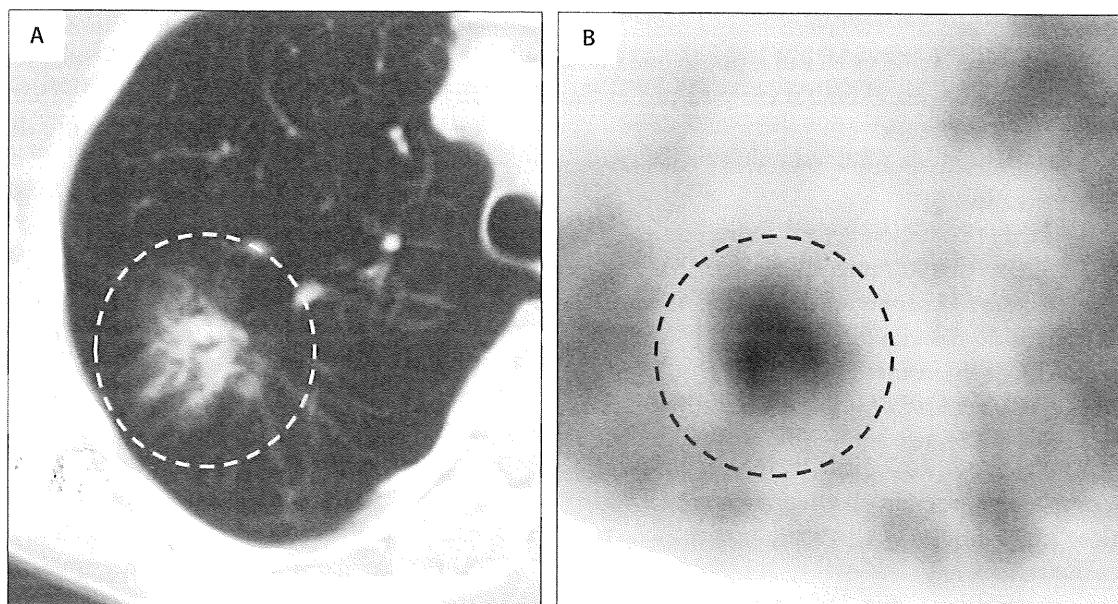
La tomografía por emisión de positrones o PET (*Positron Emission Tomography*) consiste en un anillo de detectores (cristales de centelleo) que son capaces de localizar la acumulación de radiofármacos emisores de positrones como por ejemplo la flúor-18 deoxi-glucosa (F-18 glucosa o FDG).

Los equipos actuales de PET son llamados "híbridos" o PET/TC porque están compuestos por dos equipos en tandem, un PET y un tomógrafo computarizado (TC).

La glucosa marcada se inyecta por vía EV y se distribuye por todo el cuerpo como lo hace la glucosa común. Tiene una vida media muy corta, de solo 110 minutos.

El fundamento diagnóstico del PET se basa en que las células neoplásicas tienen más receptores de membrana y consumen mucha más glucosa que los tejidos normales y por lo tanto tienen mayor captación de glucosa marcada (Figura 1.10).

- Esta molécula parecida a la glucosa normal no es destruida en el proceso de glucólisis y permanece en la célula como trazador.
- El resto de los tejidos también captan glucosa, pero menos intensamente. Es importante reconocer la captación normal y sus variantes para no confundirla con patología.



**Figura 1.10** Fusión PET/TC. **A** TC de tórax con ventana pulmonar; **B** PET de tórax. Adenocarcinoma de pulmón. Imagen de bordes irregulares con broncograma aéreo, en lóbulo superior derecho. Muestra intensa captación del radiotrazador (glucosa marcada con Flúor-18), lo que indica hipermetabolismo de la lesión.

- Es normal la captación en cerebro, corazón, glándulas salivales, grasa parda, tracto digestivo, hígado, tracto urinario, músculos y gónadas.

Con la ayuda de la fusión con TC y entrenamiento, en general no resulta difícil diferenciar la captación fisiológica de la patológica. Lo que interesa desde el punto de vista oncológico es la captación focal o “nódulos calientes”.

También se pueden emplear otros radiotrazadores como la F-18 colina (para cáncer de próstata), F-18 DOPA (para tumores neuroendocrinos y cerebro), etc.

Para medir el grado de captación se emplea el SUV (*Standard Uptake Value*) que es un valor relativo (depende de la dosis injectada, el peso del paciente y el tiempo transcurrido desde la inyección EV).

#### Ventajas, limitaciones e indicaciones

##### Ventajas

- Es un método útil y costo-efectivo en oncología para mejorar la estadificación, detectar recaídas y metástasis, incluso cuando los exámenes convencionales son negativos.
- También para evaluar la respuesta al tratamiento (por ej. quimioterapia, radioterapia).
- Se emplea de manera creciente por su impacto en la estadificación y el cambio de conducta terapéutica en aproximadamente  $\frac{1}{3}$  de los casos con neoplasias malignas.
- A diferencia de los estudios convencionales, el PET/TC incluye todo el cuerpo, lo que es una ventaja importante en oncología.
- El PET aporta el “mapa metabólico” mostrando dónde se localizan las moléculas marcadas y la TC aporta el “mapa anatómico”. La fusión de ambas imágenes logra mayor sensibilidad y especificidad.

##### Limitaciones

- La dosis de radiación es elevada, por lo que está contraindicado durante el embarazo y su uso es limitado en niños y jóvenes.
- Mayor costo y disponible solamente en centros muy especializados.
- El límite de resolución actual de los equipos PET es de 7-10 mm, por lo tanto las lesiones más pequeñas pueden pasar desapercibidas (falsos negativos). No es el método adecuado para detectar nódulos muy pequeños ni micrometástasis.
- La glucosa marcada también puede acumularse en procesos inflamatorios o infecciosos (falsos positivos) como cicatrices quirúrgicas recientes, abscesos, etc. Sin embargo, teniendo en cuenta los antecedentes clínicos junto con la TC, habitualmente es factible diferenciarlos.
- Hay tumores con bajo metabolismo de la glucosa (por ej. hepatocarcinoma, carcinoide, etc.) que no son buenos candidatos para PET.

##### Indicaciones principales

- El PET/TC con glucosa marcada está indicado sobre todo en oncología (por ej. linfoma, cáncer de colon, pulmón, cabeza y cuello, melanoma, mama, gónadas, GIST, esófago, etc.). Se utiliza para:
  - Caracterizar nódulos pulmonares como malignos o benignos.
  - Estadificar neoplasias.
  - Detectar recurrencia y metástasis, cuando otros exámenes son negativos o dudosos o hay aumento de marcadores con imágenes convencionales negativas.
  - Evaluar la respuesta al tratamiento.
  - Buscar tumores primarios ocultos.
- Las principales indicaciones no oncológicas del PET con glucosa marcada son:
  - Buscar focos infecciosos ocultos en pacientes con fiebre de origen desconocido.
  - Epilepsias que no responden al tratamiento médico, como examen prequirúrgico.
  - Enfermedad de Alzheimer (detección precoz de placas de amiloide en el cerebro).
  - Viabilidad miocárdica, solo en pacientes con otros exámenes muy dudosos.

Continuamente se desarrollan nuevas moléculas y radiotrazadores que extienden las indicaciones del PET/TC.

## ■ Imágenes moleculares y funcionales: la nueva frontera

### Introducción

Tradicionalmente, las imágenes solo aportaban información anatómica y poca o ninguna información funcional. En los últimos años hay un creciente interés por las llamadas “imágenes funcionales o moleculares”, que estudian los mecanismos fisiológicos mediante el seguimiento de diversas moléculas (naturales o artificiales) dentro del organismo, usando diferentes métodos de diagnóstico por imágenes.

Estas tecnologías están revolucionando la comprensión de la fisiología y fisiopatología, sobre todo en oncología, y son la nueva frontera del Diagnóstico por Imágenes. Se espera que mejoren el diagnóstico precoz y más específico de las enfermedades y el control del tratamiento.

Las imágenes moleculares han sido definidas por Ralph Weissleder (“Molecular Imaging” publicado en Radiology en 2001) como la “caracterización y medición *in vivo* de procesos biológicos a nivel celular y molecular”. Se obtienen con varios métodos:

- MN (cámara gamma y SPECT), empleando varios radiotrazadores.
- PET/TC, también utilizando diversos radiotrazadores.

- RM, mediante algunas técnicas para estudiar moléculas naturales como el agua (RM difusión), sangre (RM perfusión), oxígeno (RM funcional cerebral), etc.
- Imágenes ópticas, que emplean sustancias fluorescentes naturales o artificiales.

En las imágenes moleculares desempeñan un papel muy importante los trazadores o marcadores moleculares, que permiten el seguimiento de un proceso fisiológico dentro del organismo. Los marcadores o biomarcadores pueden clasificarse en artificiales o exógenos y naturales o endógenos.

Los artificiales o exógenos son productos farmacéuticos, sobre todo radiofármacos, que pueden ser seguidos dentro del cuerpo mediante exámenes de MN y PET/TC. También incluyen a diversos contrastes y fotocromos.

Generalmente se administran por vía endovenosa. Por su tamaño se las agrupa en macropartículas, micropartículas y nanopartículas. Se esperan grandes progresos de la farmacología basada en las nanopartículas. El tamaño microscópico de estas drogas les permite pasar con facilidad las barreras celulares.

Los naturales o endógenos son sustancias que normalmente existen en el organismo, como agua, sangre, oxígeno, fotocromos, etc., que pueden ser identificados con estas nuevas técnicas de imágenes, sobre todo con RM e imágenes ópticas.

En la Tabla 1.9 se resumen los métodos de acuerdo con sus capacidades de brindar más información morfológica o funcional.

### Imágenes ópticas y fluorescentes

Las llamadas imágenes ópticas son nuevas tecnologías que exploran unas características particulares de los tejidos, que son la bioluminiscencia y la fluorescencia.

Usando una luz externa de una longitud de onda apropiada (cercana al infrarrojo) se puede "excitar" una molécula fluorescente. La fluorescencia de los tejidos es producida por moléculas de origen endógeno (hemoglobina) y exógeno (proteínas) que actúan como "medios de contraste".

La mayor limitación de las imágenes ópticas es la escasa penetración de la luz, que limita el método a la exploración de tejidos superficiales (por ej. piel y mucosas) y órganos poco profundos (por ej. mamas, ganglios linfáticos).

También se utilizan en endoscopias bronquiales y digestivas para aumentar la detección de áreas de mucosa displásica precancerosa y neoplasias en los bronquios, así como pólipos en el colon. El "contraste" fluorescente se inyecta por vía EV.

Están en fase experimental equipos de mayor complejidad, que esencialmente son tomógrafos computarizados con detectores sensibles a la fluorescencia.

### Imágenes cuantitativas y CAD

Los continuos avances de las computadoras y el desarrollo de nuevos softwares han permitido obtener mayor información no solo morfológica sino también cuantitativa.

La cuantificación incluye:

- Mediciones lineales, de superficie y de volumen (3D).
- Cuantificación automática de calcificaciones vasculares, particularmente coronarias (*calcium score*).
- Análisis y cuantificación automática de la perfusión sanguínea tisular (encéfalo, etc.).
- CAD para identificación de tumores del colon, mama y pulmón, etc.
- Cuantificación automática del enfisema pulmonar.
- Planificación para radioterapia.

Los CAD (*Computed Assisted Diagnosis*) son sistemas de diagnóstico asistido por computadoras que de manera automatizada permiten identificar lesiones en diversos exámenes (por ej. nódulos pulmonares, microcalcificaciones y nódulos mamarios, pólipos en endoscopias virtuales con TC, embolias pulmonares en TC, etc.).

### ■ En síntesis

Es un hecho que las imágenes se utilizan y se utilizarán cada vez más. Constituyen un arma indispensable de la medicina moderna, que permite objetivar y documentar los procesos patológicos y su evolución.

Las imágenes son una herramienta formidable, que bien utilizada mejora los diagnósticos, reduce los tiempos de internación, evita procedimientos invasivos y costosos así como cirugías innecesarias y sirve para monitorear la respuesta al tratamiento de numerosas enfermedades.

**Tabla 1.9** Métodos morfológicos y funcionales

Métodos morfológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Radiología</li> <li>▪ Angiografía</li> <li>▪ Ecografía</li> <li>▪ Tomografía computarizada</li> <li>▪ Resonancia magnética (difusión, espectroscopia, funcional cerebral, perfusión)</li> <li>▪ Medicina nuclear</li> <li>▪ PET/TC</li> <li>▪ Imágenes ópticas y fluorescentes</li> </ul>
Métodos funcionales	

Las imágenes se emplean cada vez más en investigación básica y clínica, para mejorar la comprensión de los fenómenos fisiológicos y patológicos.

Existe una tendencia creciente a utilizar las imágenes para mejorar los *screening* (tamizajes) de enfermedades en poblaciones de riesgo (por ej. cáncer de mama, pulmón, etc.) con la esperanza de que el tratamiento precoz cambie el resultado final, como ha ocurrido por

ejemplo con el cáncer de cuello uterino. Es un nuevo camino y el tiempo dará su veredicto.

El médico necesita actualizar sus conocimientos durante toda la vida profesional, con los cambios permanentes en las ciencias básicas y clínicas.

Además de todo esto, será necesario preservar más que nunca el criterio clínico, que sigue siendo la herramienta imprescindible de todos los médicos.