

pero si los productos necesarios para poner en marcha el proceso industrial (por ejemplo, las materias primas) no reúnen un mínimo de calidad, el servicio a los clientes que se produzca como consecuencia de llevar a cabo el proceso no dará lugar a un producto manufacturado que realmente satisfaga las necesidades del cliente o, simplemente, no será un producto competitivo. Esto mismo se puede aplicar al laboratorio analítico: la información generada tendrá cierto nivel de calidad si, tanto el proceso analítico como los materiales utilizados (disolventes, reactivos, patrones, etc.), tienen un grado mínimo de calidad. Es por este motivo que, cada vez más, el objetivo es la calidad integral, ya que la calidad interna de una empresa o entidad no puede conseguirse o no tiene proyección exterior si no existe también una *calidad externa* aplicada en una doble dirección: exigencia de calidad a los suministradores y satisfacción de las necesidades del cliente. Pero, además, esta aproximación se potencia y enriquece con el concepto de GESTIÓN DE LA CALIDAD TOTAL (*Total Quality Management*), que la UNE-EN-ISO 8402 define como "forma de dirigir una organización, centrada en la calidad, basada en la participación de todos sus miembros con el objetivo del éxito a largo tiempo a través de la satisfacción del cliente y beneficiar a todos los miembros de la organización y a la sociedad". Según esta definición, nos encontramos con nuevas implicaciones internas y externas en la gestión de una organización (empresa, laboratorio, etc.), centrando dicha gestión en el concepto de calidad que ya se ha definido. Internamente nos dice que beneficia a todos los miembros de la organización. Esto es, procura establecer incentivos e ilusión por los objetivos entre el personal a todos los niveles, preocupándose por una formación y preparación continuada, con salarios acordes al trabajo y productividad realmente conseguida y procurando la máxi-

ma seguridad y comodidad en las condiciones de trabajo. La propia estructura de la organización se debe beneficiar de la correcta asignación de responsabilidades, del tipo de jerarquía (autoridad) establecida y la correcta relación entre los diferentes niveles. Esta estructura se depurará hasta conseguir el óptimo funcionamiento. La aplicación de una gestión de la calidad total también implica una proyección externa a la organización. En primer lugar por la satisfacción de los clientes, pero también se señala que la sociedad en su conjunto (la actual y la futura) debe beneficiarse como consecuencia de aplicar este tipo de gestión. Estos beneficios se refieren, por ejemplo, a que la actividad de la organización tenga en cuenta la preservación del medio ambiente, que se racionalice el consumo de materias estratégicas (ahorro de energía y recursos naturales escasos), que no genere materias peligrosas, etc. Realmente, este tipo de gestión representa una clara tendencia de futuro (en gran medida utópica en la actualidad), pero que se irá imponiendo como consecuencia de la presión creciente de sindicatos, organizaciones ecologistas, estrategias de recursos (humanos y materiales), etc. Hay que entenderlo como una "cultura" hacia la que avanzamos y el convencimiento de la organización en adoptar una mayor amplitud de miras (mayor compromiso social).

Los laboratorios analíticos estarán también comprometidos con la calidad total y esta forma de gestionar su actividad. La tendencia es que no bastará con un sistema de Aseguramiento de la Calidad, sino que además habrá que buscar el beneficio (profesional y salarial) del personal, del propio laboratorio y con proyección hacia la sociedad. La incorporación de "métodos limpios", la gestión de los residuos, el ahorro de materias primas a través de la miniaturización de la instrumentación, ahorro energético sustituyendo métodos clásicos de tratamiento de muestras por métodos

automáticos, etc., son ejemplos que van en esa dirección. Esta tendencia existe ya a nivel empresarial. Hace unos años parecía suficiente la certificación de la calidad empresarial en el marco de las ISO 9000 (Aseguramiento de la Calidad). Bajo la filosofía de la gestión de la calidad total, más recientemente han aparecido las normas ISO 14000 sobre gestión medioambiental para comprometer a la empresa con su entorno. Se trata de "producir calidad" (del producto, proceso o servicio característico de la empresa), preservando y potenciando la calidad de los propios trabajadores, de la organización y del entorno social y natural.

Ángel Ríos Castro  
División de Química Analítica  
Universidad de Córdoba

## Uso de las radiaciones ionizantes en Medicina: Radiodiagnóstico, Radioterapia y Medicina Nuclear

### 1. INTRODUCCIÓN

Desde el descubrimiento de los rayos X hasta nuestros días el uso de las radiaciones en medicina ha experimentado un gran desarrollo, tanto en diagnóstico como en terapia. No se puede entender la medicina actual sin la aplicación de técnicas asociadas a las radiaciones.

En los últimos tiempos el avance ha sido más espectacular, si cabe, debido en gran medida al progreso de las nuevas tecnologías informáticas. En un artículo que apareció recientemente en la revista "A Distancia" (*Imagen médica: nuevas tecnologías diagnósticas y terapéuticas*, J. C. Antoranz y C. Santa Marta), se expone con claridad este proceso.

Este artículo se va a centrar en el uso de las **radiaciones ionizantes**. Las aplicaciones de las **radiaciones no-ionizantes** (ecografía, resonan-

cia magnética, láseres) son, también, cada día más importantes y podría, sin duda, ser tema para otro trabajo.

Lo que nunca hay que olvidar es que aunque las aplicaciones de las radiaciones ionizantes están aportando un beneficio indudable, su uso también tiene un riesgo inherente. Del estudio de estos peligros y del modo de minimizarlos, y a la vez optimizar la obtención de beneficios, surge la **Protección Radiológica**, que establece los protocolos de actuación en cada una de las instalaciones donde se trabaja con radiaciones ionizantes. En cada uno de los sistemas e instalaciones que se van a describir a continuación existe una serie de normas y revisiones, que aseguran que tanto los pacientes como el personal que trabaja en ellas, la familia, acompañantes y público en general, estén correctamente protegidos.

## 2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LOS RAYOS X

### 2.1. Un poco de Historia

El descubrimiento de los rayos X ocurrió por accidente. Un físico alemán llamado Wilhelm Röntgen estaba investigando las propiedades de la electricidad. El 8 de noviem-



Figura 1. Fotografía de Wilhelm Röntgen.

bre de 1895, observó que cuando los rayos catódicos, de un tubo de Crookes<sup>1</sup>, chocaban con la pared del tubo se producía una fluorescencia<sup>2</sup> en una cartulina impregnada de platocianuro de bario que se encontraba en la zona de trabajo de manera casual. A esta radiación, por su desconocida naturaleza y misterioso comportamiento, la denominó radiación X, y experimentó sistemáticamente con ella. Comprobó que era capaz de atravesar materiales tales como cartón, madera, etc., pero que era interceptada en diferente medida por otros como el plomo, el bario, etc. Observó, también, que un cuerpo complejo como por ejemplo una mano, era transparente en sus zonas musculares pero no en las óseas, distinguiéndose con nitidez los huesos, cuyas sombras destacaban del conjunto. Colocando su mano delante de la pantalla, fue la primera persona que pudo ver la sombra de sus huesos.

Experimentó el efecto de la nueva radiación sobre las placas fotográficas, y descubrió que las impresionaba lo mismo que la luz visible. Todas estas experiencias, comunicadas en las sesiones de la Sociedad de Física y Medicina de Würzburg del 28 de diciembre de 1895, supusieron el nacimiento de la técnica de la Radiografía, esencial actualmente en la Medicina y en la Industria.

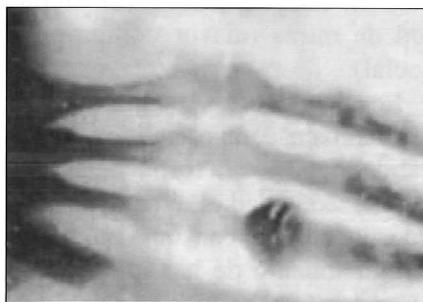


Figura 2. Una de las primeras radiografías realizadas por Röntgen. La realizó el 23 de enero de 1896. Se aprecia un anillo.

<sup>1</sup> **Tubo de Crookes** – Antecesor de los modernos tubos de Neón, de rayos X y fluorescentes.

<sup>2</sup> **Fluorescencia** – Emisión de luz visible por un átomo excitado, la cual se extingue al cesar el estímulo que la provoca externamente.

Recomiendo la lectura de un artículo publicado previamente en el nº 0 de esta revista, páginas 72-74 (El descubrimiento de los rayos X, M. Yuste), donde estos comienzos históricos están más ampliados.

El anuncio del descubrimiento causó una sensación inmediata, incluso en las revistas se publicaban poemas con el hallazgo. Las tiendas del Londres victoriano anunciaban ropa a prueba de rayos X. En España, José Echegaray escribió un artículo, que se publicó en el periódico "El Liberal" de Madrid, el 3 de agosto de 1896.

Al cabo de los meses los médicos usaron la nueva tecnología para "ver" los huesos rotos en los soldados heridos. Pero esta técnica tenía otros efectos colaterales como quemaduras en la piel y pérdida de pelo, se tuvieron que empezar a desarrollar, paralelamente, los estudios de protección radiológica.

### 2.2. Formación y emisión de los rayos X

En la actualidad se conoce perfectamente la naturaleza de los rayos X y sus propiedades. Se trata de una radiación electromagnética de longitud de onda comprendida entre  $5 \cdot 10^{-9}$  y  $5 \cdot 10^{-12}$  m aproximadamente. Estas longitudes de onda corresponden a la región del espectro electromagnético situada entre la radiación ultravioleta y los rayos gamma, si bien el límite con éstos últimos es impreciso y la clasificación obedece más a los modos de producción de las radiaciones que a su longitud de onda, los rayos X son un fenómeno atómico (se debe a la emisión de energía en los saltos de los electrones orbitales) y la radiación gamma es un fenómeno nuclear.

La longitud de onda tan pequeña es lo que le confiere la capacidad de poder atravesar determinados materiales. Su capacidad de penetración es tanto mayor cuanto mayor es su energía, cuanto más baja es la densidad de la materia y cuanto menor es el número atómico promedio de dicha materia atravesada. La radiación se atenúa al atravesar la mate-

ria, lo que quiere decir que parte de ella es absorbida. La fracción absorbida produce radiación difusa o secundaria y puede producir lesiones en los organismos vivos.

Cuando electrones con mucha energía, que viajan a gran velocidad, chocan con un material metálico, se producen rayos X. Esta producción de rayos X se debe a dos procesos diferenciados. Por un lado, los electrones energéticos penetran hasta la zona profunda de los niveles atómicos del material con el que han chocado, y arrancan electrones que al salir dejan huecos. Estos huecos van a ser llenados por otros electrones que están en capas superiores de energía. En la transición entre los niveles se emite energía en forma de radiación electromagnética, con una longitud de onda correspondiente a los rayos X. Se obtiene así un espectro de **rayos X característicos**, con una serie de líneas de energías bien definidas (monoenergéticos), cuyo valor es el correspondiente a la diferencia de energía entre los niveles y son característicos del metal. Pero ocurre otro proceso simultáneo a éste, cuando los electrones energéticos se acercan al núcleo, por la acción del campo coulombiano de éste, sufren una variación brusca de su velocidad, lo que hace que emitan radiación electromagnética. Esta radiación se llama **radiación de frenado o bremsstrahlung** y presenta un espectro continuo. También es en el rango de los rayos X.

### 2.3. Tubo de rayos X

La descripción esquemática de un tubo de rayos X y su funcionamiento sería la siguiente: El cátodo del tubo de rayos X libera electrones por efecto termoiónico<sup>3</sup> al ser calentado con una corriente. Una vez emitidos desde el filamento, los electrones permanecen momentáneamente en su proximidad antes de ser acelerados hacia el ánodo por la diferencia de potencial (kV) que se

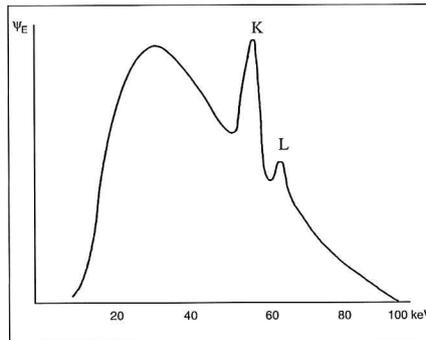


Figura 3. Típico espectro de emisión de rayos X. En él se observa la zona continua, debido a la radiación de frenado, y los dos picos característicos (capa K y capa L), debidos a los saltos de los electrones entre capas internas del átomo, en este ejemplo de wolframio.

establece entre el cátodo y el ánodo. Los electrones que viajan desde el cátodo hacia el ánodo constituyen la corriente del tubo de rayos X y a veces se les denomina electrones proyectil. Cuando esos electrones chocan contra el material pesado del blanco, interactúan con él y transfieren su energía cinética al blanco. El valor de la energía cinética máxima coincide numéricamente con la diferencia de potencial aplicada, así para tensiones de 100 kV los electrones llevan una energía de 100 keV<sup>4</sup>. Estas interacciones se producen dentro de una profundidad de penetración muy pequeña en el blanco.

Los electrones proyectil interactúan con los electrones orbitales o los núcleos de los átomos blanco, dando lugar a la transformación de la energía cinética en energía térmica (calor) y en energía electromagnética (rayos X).

Esta energía depende del material anódico, la energía máxima del espectro depende de la tensión aplicada, y su intensidad de la densidad de electrones que salen del cátodo, es decir, del calentamiento del filamento. También se producirán rayos

<sup>4</sup> eV – Electronvoltio. En física nuclear las energías se expresan en eV. Un eV, por definición, es la energía cinética que posee un electrón, inicialmente en reposo, después de ser acelerado por la diferencia de potencial de un voltio. Es una unidad muy pequeña,  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , por lo que es muy frecuente el uso de sus múltiplos, keV y MeV.

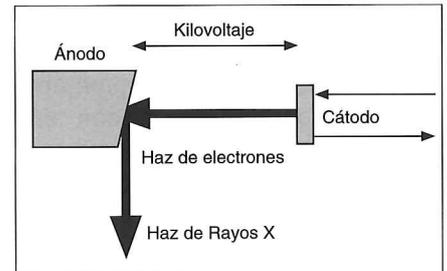


Figura 4. Esquema de los componentes mínimos de un tubo generador de rayos X.

X característicos del metal al arrancar los electrones incidentes a los electrones atómicos del metal.

### 2.4. Interacción de los rayos X con la materia. Formación de la imagen radiológica

La susceptibilidad a la radiación electromagnética de las sales de plata es la propiedad fundamental que se usa para la formación de la imagen radiológica.

La película radiográfica consiste en un soporte transparente, recubierto por sus dos caras por una capa delgada de gelatina en la que se encuentran, en suspensión, cristales pequeños de halogenuros de plata. Cuando actúa sobre la película un haz de radiación, los halogenuros de plata se reducen a plata metálica finamente dividida, cuya cantidad es función de la intensidad de la radiación que ha incidido sobre ella. El depósito de estos granos de plata metálica se consigue por la acción del revelador; los granos sobre los que no ha actuado la radiación son disueltos por el fijador. Finalmente, en el último lavado se elimina el exceso de reactivo.

Los fotones utilizados en radiodiagnóstico tienen una energía comprendida en el rango de 20 a 120 keV y los procesos de interacción con los materiales biológicos son los de interacción fotoeléctrica<sup>5</sup> e interac-

<sup>5</sup> El efecto fotoeléctrico – El fotón X o gamma es completamente absorbido y toda su energía comunicada a un electrón. Se puede interpretar como una transferencia total de la energía del fotón a un electrón ligado del átomo. Esta interacción es la dominante a bajas energías, por debajo de los 100 keV, en tejidos biológicos.

<sup>3</sup> Efecto termoiónico – Emisión de electrones por calentamiento de un filamento.

ción Compton<sup>6</sup>. En el efecto fotoeléctrico el fotón desaparece mientras que en el efecto Compton aparece un segundo fotón con una energía inferior a la del fotón inicial y se produce una deposición parcial de energía.

La imagen radiológica se forma por los fotones que han sido transmitidos por el paciente y han alcanzado la película fotográfica donde se forma la imagen. Estos fotones pueden ser primarios, que son los fotones que no han interactuado con el paciente, o secundarios, que son los que han sufrido una o varias interacciones Compton.

Los fotones primarios son los que transportan la información más útil, ya que su intensidad en cada parte del haz depende de la probabilidad de que los fotones incidentes interactúen en el interior del paciente y de las características físicas de los tejidos atravesados. El contraste entre las imágenes correspondientes a las distintas estructuras se debe por tanto a la distinta absorción de los fotones incidentes y ésta será por tanto mayor cuanto mayor sea la probabilidad por efecto fotoeléctrico fundamentalmente.

Así, por ejemplo, si el haz incidente atraviesa el hueso y tejido blando, en este último se perderán menos fotones por tener un coeficiente de absorción menor que el hueso, depositándose más energía en la zona de la placa fotográfica donde llegue la radiación que ha atravesado el tejido blando, produciéndose el ennegrecimiento característico de las películas radiográficas (más negro donde hay menos absorción).

Los fotones dispersados son originados principalmente por la interacción Compton y su intensidad aumenta al hacerlo la energía media del haz y el volumen atravesado. Estos fotones pueden llevar cualquier dirección dando lugar a un velo sobre la imagen que deteriora el contraste.

<sup>6</sup> El efecto Compton – El fotón X o gamma incidente sólo cede al electrón con el que choca una parte de su energía, convirtiéndose en otro fotón de menor energía, desviado de su trayectoria inicial. Es la interacción predominante a energías intermedias, entre 100 y 1000 keV, en tejidos biológicos.

Si la transmisión es muy pequeña habrá muy pocos fotones que lleguen al receptor de la imagen y la dosis absorbida por el paciente será muy alta. Si la transmisión es próxima a la unidad las diferencias de absorción en los distintos tejidos será pequeña y el contraste en la imagen pobre. La elección de la diferencia de potencial (kV) adecuada para la obtención de una imagen radiológica ha de ser un compromiso entre los requerimientos de baja dosis y alto contraste.

El contraste disminuye al aumentar la tensión aplicada al tubo (aumenta la energía, keV). Para obtener suficiente contraste entre la grasa y el músculo es necesario usar tensiones bajas (de 25 a 30 kV en mamografía, por ejemplo).

### 3. RADIOLOGÍA CON EQUIPOS DE DIAGNÓSTICO

#### 3.1. Mamografía

El examen radiográfico de los tejidos blandos utiliza técnicas especiales que se diferencian bastante de las normales. Esto se debe a las importantes diferencias entre las estructuras anatómicas a radiografiar. En la radiografía convencional, el contraste del sujeto es grande, debido a las grandes diferencias en densidad de masa y número atómico efectivo<sup>7</sup> entre huesos, músculos, grasa y tejido pulmonar. En la radiografía de tejidos blandos sólo intervienen músculos y grasa, que tienen números atómicos muy similares y densidades parecidas. Por lo que en la radiografía de tejidos blandos las técnicas están orientadas a incrementar la absorción diferencial entre estas dos estructuras tan parecidas.

El principal ejemplo de radiografía de tejidos blandos es la mamografía o examen radiográfico de la mama. El motivo para el interés y desarrollo de la mamografía es la

<sup>7</sup> Número atómico efectivo – Cuando los materiales están formados por varios elementos químicos, se usa el número atómico efectivo que es el número atómico medio del material teniendo en cuenta todos sus elementos constituyentes.

elevada incidencia del cáncer de mama. Casi todos los médicos coinciden en que la detección precoz del cáncer de mama permite un tratamiento más eficaz, con la consiguiente disminución del número de muertes. La mamografía ha demostrado ser un método de detección precoz muy preciso.

Dado que la densidad de masa y el número atómico efectivo de los tejidos blandos que forman la mama son muy similares, las técnicas radiográficas normales son completamente inútiles. Para el rango comprendido entre los 70 y los 100 kV, la difusión Compton predomina en el tejido blando, ya que la absorción diferencial entre tejidos de composición muy similar es mínima. Se requieren técnicas de baja tensión para maximizar el efecto fotoeléctrico y mejorar así la absorción diferencial. Sin embargo, al reducir la tensión de pico se reduce también la capacidad de penetración del haz, lo que requiere un incremento de la corriente instantánea. Si se reduce demasiado la tensión, la corriente necesaria será tan grande que aumentará significativamente la dosis que recibe el paciente.

#### 3.2. Fluoroscopia

Desde que fue inventada en 1896 por Thomas A. Edison la fluoroscopia ha sido una herramienta muy valiosa en la práctica de la medicina. Su principal utilidad es la de hacer exámenes dinámicos, es decir, la fluoroscopia se utiliza para visualizar el movimiento de estructuras y líquidos internos. Durante la fluoroscopia y mientras esté conectado el generador de rayos X, el radiólogo ve una imagen en movimiento. Si se considera que algo debe grabarse para un estudio posterior, se puede realizar una radiografía. Dicha radiografía se conoce como serirradiografía.

#### 3.3. Imagen digital

Las radiografías convencionales deben ser reveladas, lo cual supone un retraso en el diagnóstico. Además, una vez obtenida la imagen,

apenas se puede hacer nada para mejorar la información que contiene.

La nueva metodología para obtener imágenes médicas se basa en la transformación de las imágenes analógicas convencionales en imágenes digitales, lo que permite procesar los datos digitales adecuadamente y mostrarlos de forma que parezcan una imagen convencional. Esta conversión y manipulación de datos no sería posible sin los avances registrados de la tecnología informática.

La imagen que se obtiene mediante técnicas digitales es distinta de la obtenida en radiografía y fluoroscopia convencionales. Con estas últimas técnicas, la imagen se forma directamente sobre el receptor de imagen, elemento fosforescente o película. Con las técnicas digitales, los rayos X forman una imagen electrónica en los detectores de radiación, que se manipula a continuación por el ordenador, almacenada temporalmente en la memoria y finalmente presentada como una matriz de intensidades.

### 3.4. T.C. (Tomografía computerizada)

La innovación de la T.C. radica en que no almacena las imágenes del modo convencional. En un equipo de T.C. no existe un receptor de imagen tipo película. Un haz de rayos X colimado atraviesa al paciente, la radiación residual es medida por unos detectores y los valores se envían a un ordenador. Para evitar la superposición de puntos en la imagen, el tubo y los receptores se mueven sincrónicamente y los datos recogidos por los detectores son manipulados matemáticamente para saber qué cantidad de absorción de radiación le corresponde a cada punto del paciente y a partir de este dato reconstruye una imagen tridimensional, sin superposición. El ordenador analiza la señal que le llega del detector, reconstruye la imagen y la muestra en un monitor. La imagen puede ser almacenada para un análisis posterior. La reconstrucción de la sección de la anatomía estudiada se realiza me-

dante algoritmos matemáticos. Las ventajas sobre la radiología convencional son:

- Imagen tridimensional – Vemos los detalles anatómicos sin superponerse unos a otros.
- Mejoría de la resolución en contraste – Podemos “ver” dentro de las vísceras.

La imagen total de un órgano la hacemos a través de cortes sucesivos, bien contiguos o no, de grosores variables (rango de 1 a 10 mm son utilizables en la actualidad).

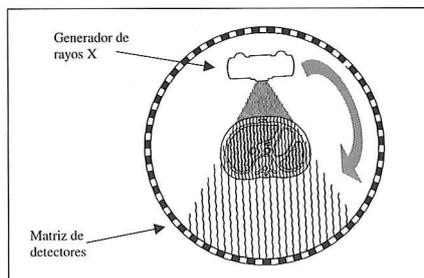


Figura 5. Dibujo esquemático de un equipo de Tomografía computerizada. La única parte móvil es el generador, la matriz de detectores permanece fija.

## 4. RADIOTERAPIA

La especialidad médica que aborda la terapéutica con radiaciones ionizantes es la radioterapia. A diferencia del diagnóstico, en este campo el objetivo es administrar adecuadamente una dosis en un volumen determinado para la transformación de un tejido enfermo.

En la radioterapia se intenta alcanzar un compromiso entre la administración de una dosis adecuada al volumen de tejido enfermo y una dosis aceptablemente pequeña a los tejidos sanos circundantes. Si la dosis es demasiado alta la tasa de complicaciones se incrementa, pero si es demasiado baja la probabilidad de control del tejido enfermo disminuye. Se barajan dosis altas en zonas muy bien delimitadas que oscilan de los 40 a los 70 Gy<sup>8</sup> o más, adminis-

tradas con finalidad radical o curativa. Puntualmente, ciertas enfermedades requieren la irradiación total o de la mitad del organismo y, entonces, las dosis suministradas son bastantes más bajas (10-20 Gy).

### 4.1. Tipos de radioterapia

En función de la situación de las fuentes con relación al paciente se puede dar la siguiente clasificación:

**Curiterapia.** También se denomina braquiterapia, del griego *brachi* que quiere decir corto, donde los tratamientos se llevan a cabo con fuentes radiactivas –encapsuladas<sup>9</sup> o sólidas protegidas por una envoltura metálica– en contacto o dentro del tejido u órgano a tratar.

**Radioisótopos utilizados en curiterapia.** Casi inmediatamente después del descubrimiento del radio por Marie y Pierre Curie en 1898, se empleó para tratar el cáncer mediante su colocación en la proximidad o en contacto con el tumor. Las fuentes radiactivas pueden insertarse en el organismo en contacto directo con el tejido maligno, de manera que hay puntos que reciben dosis de radiación muy altas. Durante muchos años estos procedimientos fueron realizados con el uso del Ra<sup>226</sup>. El Ra<sup>226</sup>, cuyo papel histórico es innegable, cada vez es menos utilizado y está más restringido debido a los graves problemas de radioprotección que plantea. Hoy en día sólo se manejan radionucleidos artificiales y el tipo y la actividad de las fuentes depende de la administración de la dosis.

La tendencia clásica ha sido insertar en una sola aplicación el material radiactivo durante un cierto tiempo. Para tener una buena tolerancia del tejido la tasa de dosis debe ser baja o media y, en estos ca-

<sup>8</sup> Gy – Gray. Es la unidad del Sistema Internacional para la Dosis Absorbida, que es la energía depositada por cualquier radiación ionizante por unidad de masa del material irradiado. 1 Gy = 100 erg/g.

<sup>9</sup> Fuente encapsulada – Fuente constituida por sustancias radiactivas firmemente incorporadas en materias sólidas y efectivamente inactivas, o encerradas en una envoltura inactiva que presenta una resistencia suficiente para evitar cualquier dispersión de dichas sustancias radiactivas en las condiciones normales de empleo.

tos, el paciente permanece ingresado en habitaciones blindadas. En los últimos años se están introduciendo las aplicaciones con alta tasa de dosis. En este caso la administración de la dosis se hace fraccionadamente y cuando ésta tiene lugar el paciente permanece solo en el recinto.

**Teleterapia.** Donde la irradiación se realiza con el emisor de radiaciones a una cierta distancia del paciente. Puede ser terapia convencional con rayos X, cobaltoterapia y terapia con aceleradores de partículas.

Se emplea un mayor porcentaje de equipos de irradiación externa.

El objetivo de la radioterapia externa es administrar, repetidamente en un determinado número de sesiones, que constituyen el tratamiento, una cantidad de energía conocida en los volúmenes blanco respetando al máximo las estructuras sanas. El paciente permanece solo en el recinto y el tratamiento se controla habitualmente a través de un circuito cerrado de TV.

Para administrar la dosis al tumor un centro puede disponer de una variedad de equipos, que se clasifican en las siguientes categorías, en función del equipo que produce la radiación:

- Categoría 1: Equipos de Rayos X. En rango de 10 kV – 150 kV.
- Categoría 2: Equipos de Rayos X. En rango de 150 kV – 400 kV.
- Categoría 3: Equipos de Rayos  $\gamma$  ( $\text{Co}^{60}$ ), cobaltoterapia.
- Categoría 4: Acelerador de electrones. Producen haces de energía máxima en el rango 1-50 MeV.
- Categoría 5: Equipos de neutrones y partículas de alta energía.

## 5. MEDICINA NUCLEAR

Los objetivos de la Medicina Nuclear son la realización de pruebas de diagnóstico y de tratamientos, mediante el uso de radionucleidos

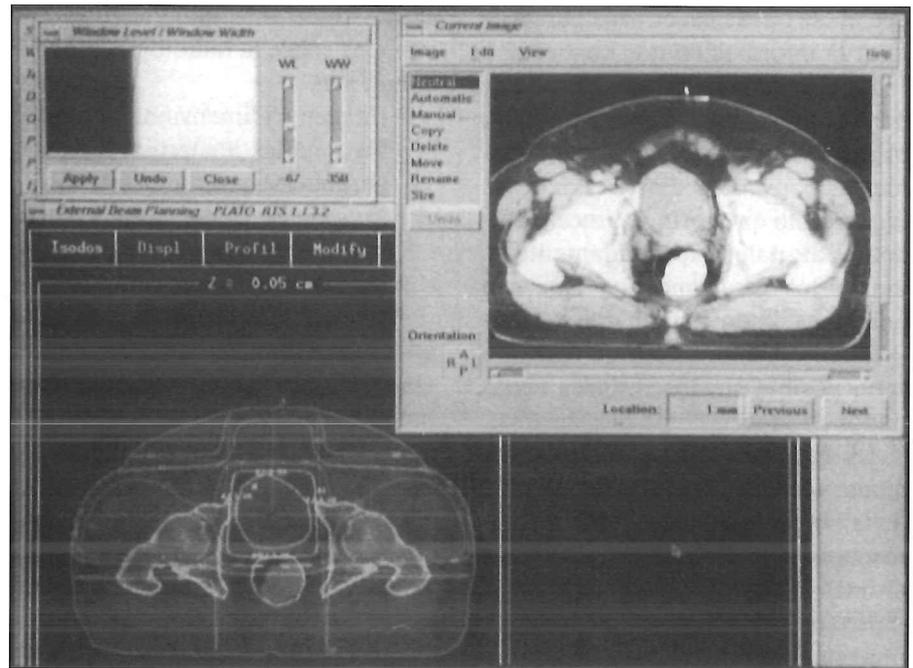


Figura 6. Programa para el tratamiento de un tumor de vejiga, con un haz de rayos X de 16 MeV, generado con un acelerador lineal.

en forma de fuentes abiertas (no-encapsuladas), no como en el caso de la radioterapia que eran fuentes encapsuladas.

La medicina nuclear data de los años 20. En el año 1946 experimenta un notable desarrollo con radionucleidos producidos en un reactor nuclear entre los que destaca el  $\text{I}^{131}$  para diagnóstico y terapia del tiroides así como el  $\text{I}^{125}$  para estudios *in vitro*.

En los años 60 aparecen las gammacámaras (Cámara de Anger) y el  $\text{Tc}^{99m}$  que son la base del diagnóstico en la actualidad.

En los últimos 15 años se desarrolla la tomografía computerizada por emisión de fotón único (SPECT) basada en el trabajo del matemático J. Radón, en el que se indica que un objeto bi o tridimensional puede ser reconstruido a partir de un conjunto infinito de sus proyecciones.

El desarrollo tecnológico y de programas de ordenador puede servir de mucha ayuda para obtener imágenes y estudios dinámicos cada vez más precisos, para lo que se requiere un adecuado programa de garantía y de control de calidad así como de protocolos cuidadosamente seguidos.

La administración a los pacientes de fuentes radiactivas abiertas se realiza mediante los llamados radiofármacos, cuyo metabolismo es la clave de la obtención de imágenes y de estudios dinámicos. Su desaparición del organismo tiene en cuenta el decaimiento físico y la eliminación biológica. Esto se refleja en un parámetro de interés que es el período efectivo<sup>10</sup>.

En la faceta de diagnóstico “in vivo” se busca la distribución espacio-temporal de un determinado radiofármaco en el organismo, dando lugar a estudios morfológicos y funcionales, mediante una secuencia de imágenes y curvas que debe ser tratada mediante ordenador. Para ello se utilizan emisores gamma de energías comprendidas entre los 100 y los 400 keV para asegurar un buen nivel de detección ya que por debajo de los 100 es muy significativa la autoabsorción

<sup>10</sup> **Período efectivo** – Se define como el tiempo necesario ( $T_e$ ) para que el contenido de un radionucleido se reduzca a la mitad, por efecto de su desintegración radiactiva y de su eliminación biológica natural. Su relación con el período de desintegración radiactiva ( $T_{1/2}$ ) y el período biológico ( $T_b$ ) es:

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_b}$$

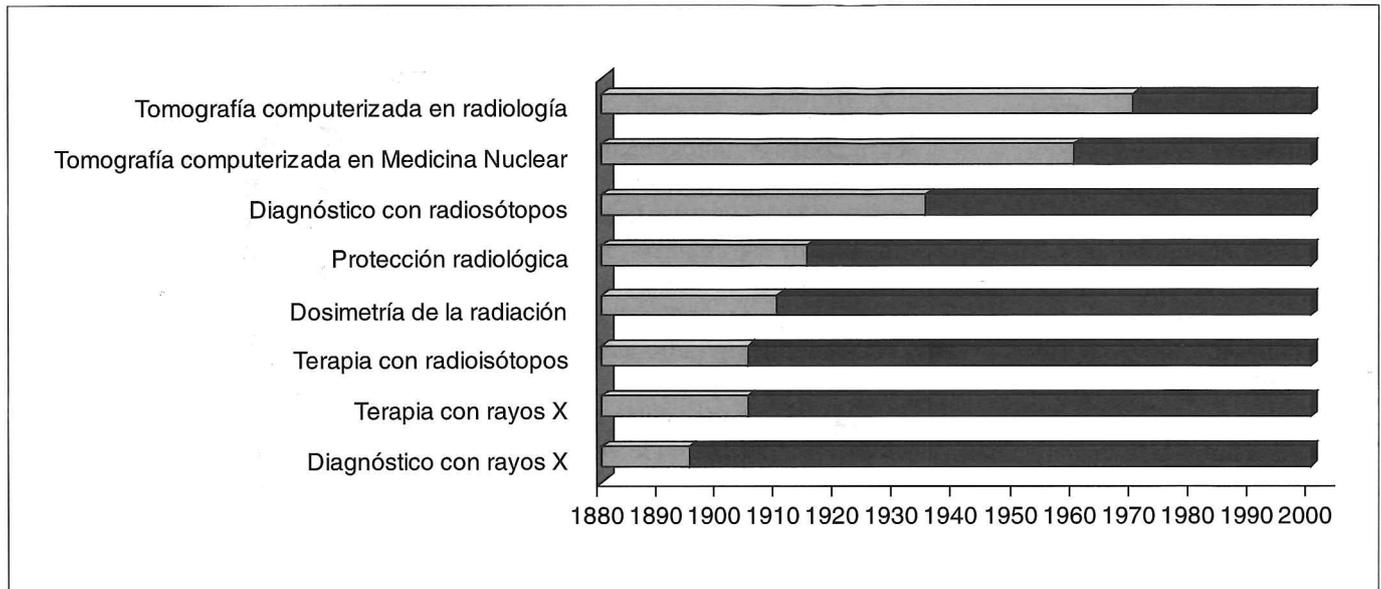


Figura 7. Evolución cronológica del uso de las Radiaciones Ionizantes en Medicina.

de los fotones por el propio paciente y por encima baja mucho la eficiencia del tipo de detector habitualmente empleado. En cuanto al período efectivo debe ser tal que permita realizar la prueba adecuadamente.

En terapia se utilizan preferentemente emisores de partículas beta u otras partículas y en cualquier caso en forma que se fijen lo más selectivamente posible en el órgano o tejido a tratar, como en el caso del  $I^{131}$  con el tiroides.

### Las fuentes en medicina nuclear

La base de la obtención de los radiofármacos de aplicación común en diagnóstico, en todos los centros, es por medio de los generadores, siendo lo más frecuente la obtención *in situ* de fármacos marcados con  $Tc^{99m}$  a partir de  $Mo^{99}$ , por elución de una solución salina a través de una columna cromatográfica, que deja pasar los iones pertecnecato y absorbe los molibdato.

Para medir la actividad de los radiofármacos se utilizan los equipos denominados calibradores de dosis o activímetros, que son cámaras de ionización con diferentes selectores ajustados para dar una respuesta en actividad para los diferentes radionucleidos.

Fuente de radiación	Tipo de emisión	Utilización
<b>Diagnóstico</b>		
Equipos de rayos X (Convencional, digital, TC)	Fotones de energía $\leq 150$ keV	Radiología Imágenes del organismo
Radionucleidos No-encapsulados	Emisores $\beta$ y $\gamma$ , energías 18 keV – 1,7 MeV	Medicina nuclear (gammacámara, SPECT, PET)
<b>Terapia</b>		
Equipos de rayos X	Fotones de energía $\leq 400$ keV	Teleterapia Radioterapia externa
Acelerador lineal	Fotones de energía $\leq 50$ MeV	Teleterapia Radioterapia externa
Fuentes encapsuladas	Fotones del $Co^{60}$ 1,17 y 1,33 MeV	Teleterapia (Cobaltoterapia) Radioterapia externa
Fuentes encapsuladas	Emisores gamma $Ir^{192}$ y $Cs^{137}$	Curiterapia Radioterapia interna
Fuentes No-encapsuladas	Emisores beta $I^{131}$ , $P^{32}$ , $Sr^{89}$	Medicina Nuclear Radioterapia metabólica

Figura 8. Cuadro resumen de la utilización de las radiaciones ionizantes en medicina.

### 5.1. Radioterapia metabólica

Se basa en la acumulación de una sustancia radiactiva no-encapsulada en el órgano o región a tratar y depositar dosis de radiación en el mismo, en función de la cantidad administrada. Generalmente, se aprovecha la radiación beta, ya que así prácticamente toda la dosis queda localizada en el lugar donde está el radionucleido.

La aplicación más característica es el tratamiento del hipertiroidismo, en el caso de riesgo quirúrgico elevado.

El hipertiroidismo se trata con cantidades del orden de algunos milicurios (mCi)<sup>11</sup> de  $I^{131}$ , teniendo

<sup>11</sup> Ci – Curio (Curie). Unidad tradicional de medida de la actividad radiactiva, en el Sistema Internacional se utiliza el Bq (Bequerelio), que equivale a una desintegración en cada segundo. 1 Ci =  $3,7 \times 10^{10}$  Bq.

en cuenta la masa de la glándula y el período efectivo medido.

## 5.2. Diagnóstico en medicina nuclear

El detector es un cristal de centelleo lo suficientemente grande como para poder ver una amplia región del organismo que va acoplado a varias decenas de fotomultiplicadores, a un circuito lógico de localización, a un analizador de altura de impulsos, a una pantalla de visualización, a un ordenador para análisis de la imagen y, finalmente, a un sistema de presentación de imagen en forma de película o impresión a color.

Tres ejemplos de sistemas de diagnóstico en medicina nuclear se describen a continuación.

**Gammacámara.**— Una gammacámara (o cámara Anger) es una modificación de un detector de centelleo que además de detectar la radiación gamma es capaz de localizar el lugar donde se produce la detección del fotón.

Los rayos gamma no se focalizan como la luz visible, siendo necesario una relación biunívoca entre la dirección del fotón gamma y el punto de detección. Esta relación se consigue por medio de un colimador, permitiendo obtener imágenes planares de la distribución frontal de la radiactividad dentro del paciente, sin tener información sobre la distancia al colimador en la que se ha originado el fotón.

Debido a la naturaleza aleatoria del fenómeno radiactivo, la calidad de la imagen mejora al aumentar el número de sucesos registrados, por ello deberá haber un equilibrio entre la actividad administrada, la sensibilidad y resolución de la gammacámara y la duración de la exploración.

La mayoría de las imágenes obtenidas con la gammacámara corresponden a estudios estáticos, siendo su evaluación visual. En los estudios dinámicos se estudian los cambios del radiofármaco con el tiempo, obteniéndose varias imágenes en diferentes instantes de tiempo, en forma de sucesión de imágenes con-

secutivas. De estas imágenes puede obtenerse una curva de actividad en función del tiempo y determinar parámetros fisiológicos, como en el caso de los estudios renales.

**Tomografía de emisión de fotón único (SPECT).**— La tomografía de emisión de fotón único (Single Photon Emission Tomography, SPECT) permite conocer la distribución tridimensional de un radionucleido en el interior del organismo. Por cada radionucleido que se desintegra desde el exterior se pretende detectar un fotón, por ello, esta técnica se denomina de emisión de fotón único.

Las imágenes SPECT se presentan normalmente en forma de cortes bidimensionales, cada uno en una posición distinta en la tercera dimensión. Ello permite por un lado medir tamaño y volúmenes, con limitaciones impuestas por la resolución del sistema, y por otro localizar mejor las distintas estructuras que en gammagrafía planar.

**Tomografía de emisión de positrones (PET).**— La tomografía de emisión de positrones (Positron emission tomography, PET) es una técnica que permite detectar y cuantificar la distribución de un radionucleido emisor de positrones en el interior del organismo. Tras sucesivas colisiones, el positrón pierde su energía y cuando está prácticamente en reposo se combina (aniquila) con un electrón orbital, convirtiéndose la masa en reposo del electrón y del positrón en energía, en forma de dos fotones de 0,511 MeV cada uno, los cuales son emitidos simultáneamente y en sentidos opuestos, pudiendo salir del organismo y ser detectados en el exterior.

Los núcleos emisores de positrones están caracterizados por tener un período de semidesintegración muy corto.

La PET se basa en la detección de los fotones producidos por la aniquilación de los positrones.

## REFERENCIAS

- J.C. Antoranz y C. Santa Marta, "Imagen médica: nuevas tecnologías diagnósticas y terapéuticas", Revista "A Distancia", Vol. 17, n.º 2 (1999).

- M. Yuste, "El descubrimiento de los rayos X", Revista 100cias@uned, n.º 0, 72-4 (1997).
- Varios autores, *Protección Radiológica (1,2,3,4)*, Colección sanidad ambiental, Ministerio de Sanidad y Consumo (1988).
- S.C. Bushog, *Manual de radiología para técnicos*, Mosby/Doyma Libros (1995).
- X. Ortega y J. Jorba, *Radiaciones ionizantes: Utilización y riesgos (Tomos I y II)*, Ed. U.P.C. (1994).
- H. Cember, *Introduction to Health Physics*, McGraw-Hill (1996).
- Varios autores, *Apuntes del Curso de verano de la UNED "Aplicaciones Biomédicas de las Radiaciones Ionizantes"* (1998).
- *Twentieth Century Physics* (Volume III), Institute of Physics Publishing (Bristol and Philadelphia) and American Institute of Physics Press (New York), 1995.

Amalia Willliart Torres  
Depto. de Física de los Materiales

## Geometría enumerativa, Topología y Física

El objetivo de esta nota es llamar la atención, con un ejemplo, sobre el hecho de que de un tiempo a esta parte está teniendo lugar un resurgimiento del contacto entre las ideas originarias de la física y las matemáticas puras.

El ejemplo es la obtención por parte del M. Kontsevich (reciente medalla Fields en 1998) y Y. Manin, [KM], de una fórmula para la enumeración de ciertas curvas algebraicas en el plano proyectivo, un problema clásico y de gran dificultad. Más concretamente han llegado a una fórmula para conocer el número de curvas algebraicas complejas de género cero y grado  $d$ ,  $N(d)$ , que pasan por  $3d-1$  puntos genéricos del plano.

Es bien sabido que hay una única recta que pasa por dos puntos,  $N(1)=1$ , y que hay una única cónica que pasa por cinco,  $N(2)=1$ . Ahora bien, ¿cuánto vale  $N(d)$ , con  $d>2$ ? Kontsevich y Manin han demostrado la siguiente fórmula recursiva que permite calcular  $N(d)$  a partir de  $N(1)$  y  $N(2)$ :