

Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes

M^a.L. España, C. Prieto, P. García y M^a.J. Béjar

Las radiaciones ionizantes tienen una gran utilidad diagnóstica y terapéutica en las áreas de medicina nuclear, radiodiagnóstico, y oncología radioterápica. El uso de los equipos TC multicorte en radiodiagnóstico, PET-TC en medicina nuclear y la IMRT o IGRT en radioterapia, son ejemplos de técnicas y equipos avanzados cada vez más presentes en la práctica médica diaria. Las exposiciones médicas son, con mucho, la mayor fuente artificial de exposición de la población a radiaciones ionizantes. Pese a concentrarse en un porcentaje relativamente pequeño de la población mundial, dichas exposiciones continúan creciendo de manera importante, especialmente en los países más desarrollados, por lo que es necesario seguir trabajando en la seguridad y protección radiológica en el uso de las radiaciones ionizantes en el ámbito médico.

Ionizing radiation is nowadays widely used for both diagnosis and therapy, mainly in nuclear medicine, diagnostic radiology and radiation oncology specialties. Benchmark techniques and advanced equipment like multi-slice CT in diagnostic radiology, PET-CT in nuclear medicine or IMRT or IGRT in radiotherapy are currently becoming regular in daily practice at hospitals. Medical exposures are by far the largest artificial source of public exposure to ionizing radiation. Although concentrated in a relatively small percentage of the world's population, these medical exposures continue to grow in a significant way, especially in developed countries. This fact makes it necessary to keep on working in radiological protection and safety at medical facilities.

INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de los rayos X (RX) por Roentgen en 1895, y de la radiactividad por Becquerel en 1896, abrieron la posibilidad de aplicar las radiaciones ionizantes a la medicina. Su aplicación a la práctica clínica comenzó a principios del siglo pasado, en 1903 Alexander Graham Bell sugirió la utilización del radio para la terapia de tumores, y en 1924 Hevesy y Christiansen realizaron el primer estudio con radionucleidos en animales, aunque es en 1936, cuando Lawrence realiza la primera aplicación clínica de la radiactividad artificial, al utilizar P-32 para el tratamiento de la leucemia. Se habían creado las bases de los tres principales campos de aplicación: el Radiodiagnóstico, la Medicina Nuclear y la Oncología Radioterápica. Desde entonces hasta el día de hoy, el desarrollo científico y tecnológico ha hecho posible que las aplicaciones de las radiaciones ionizantes tanto en el campo del diagnóstico por imagen como en el de la terapia e investigación hayan alcanzado cotas difíciles de imaginar para los pioneros de estas aplicaciones.

El mayor conocimiento de los efectos biológicos de las radiaciones io-

nizantes, y el incremento en su utilización para fines diagnósticos y terapéuticos han hecho necesario un mayor desarrollo de la protección radiológica en estas aplicaciones, tanto en las exposiciones ocupacionales y del público como en las exposiciones médicas, que incluyen la exposición de: pacientes, trabajadores en la vigilancia de su salud, participantes en programas de cribado, participantes en ensayos clínicos, y las exposiciones médico-legales.

Las exposiciones médicas son, con mucho, la mayor fuente artificial de exposición de la población a radiaciones ionizantes y continúa creciendo de forma importante. Excluyendo la Radioterapia, la dosis colectiva efectiva anual a nivel mundial proviene en un 79% del fondo natural, en un 20% del radiodiagnóstico médico, en un 1% de la Medicina Nuclear, y en porcentajes prácticamente despreciables de otras fuentes, como ensayos nucleares y accidentes (tabla 1).

Al dividir la dosis efectiva colectiva anual por el número de procedimientos se obtiene un promedio de 1.1 mSv/procedimiento en radiodiagnóstico y 6.1 mSv/procedimiento en Medicina Nuclear. Las dosis en radioterapia son muy variables, pero

MARÍA LUISA ESPAÑA

es especialista en Radiofísica Hospitalaria, jefe de Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica del H.U. de La Princesa. Su actividad profesional se ha desarrollado principalmente en el área del diagnóstico por imagen en radiodiagnóstico y medicina nuclear, y en protección radiológica en instalaciones médicas. Miembro de diversos Comités y Grupos de expertos en la actualidad participa en el Comité asesor para la información y participación pública del Consejo de Seguridad Nuclear. Actualmente es presidenta de la Sociedad Española de Protección Radiológica.

CARLOS PRIETO MARTÍN

es radiofísico hospitalario tras residencia en el Hospital Universitario de La Princesa (Madrid) y máster en energía nuclear por el CIEMAT y la UAM. Actualmente trabaja en el Servicio de Física Médica del Hospital Clínico San Carlos (Madrid) y ha desarrollado su labor profesional en los aspectos físicos del diagnóstico por la imagen, medicina nuclear, radioterapia y protección radiológica en el ámbito sanitario.

PAULA GARCÍA CASTAÑÓN

es radiofísica hospitalaria, tras realizar la residencia en el Hospital Universitario Marqués de Valdecilla (Santander). Ha trabajado en las áreas de radioterapia, diagnóstico por imagen, medicina nuclear y protección radiológica. Tiene experiencia docente en dichas áreas. Actualmente trabaja en el Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica del Hospital Universitario La Princesa (Madrid).

MARÍA JOSÉ BÉJAR NAVARRO

es radiofísica hospitalaria tras residencia en el Hospital Universitario de Salamanca. Ha trabajado en las áreas del diagnóstico por la imagen, protección radiológica y, sobre todo, en radioterapia, participando en diversas actividades docentes en dichas áreas. Actualmente trabaja en el Servicio de Oncología Radioterápica del Hospital Ramón y Cajal (Madrid).

	No procedimientos en el mundo (millones/año)	Frecuencia anual (*) (No/1000 habitantes)	Dosis efectiva colectiva anual (Sv·hombre)
Radiodiagnóstico	3.600	1.609	4.000.000
Medicina Nuclear	33	19 (diagnósticos) 0,47 (terapéuticos)	202.000
Radioterapia	5,1 (4,7 RE, 0,4 BQ) (**)	2,4	(***)

(*) Frecuencia en países con nivel sanitario I.
(**) RE = Radioterapia Externa, BQ = Braquiterapia.
(***) El concepto de dosis efectiva aplica sólo a niveles bajos de dosis (en el rango en el que ocurren sólo efectos estocásticos), por lo que no se calculan valores para radioterapia.

Tabla 1.

Fuente	Dosis efectiva anual per cápita (mSv)
Fondo natural	3.1
CT	1.5
Medicina Nuclear	0.8
Radiografía	0.3
Radiología intervencionista	0.4
Resto	0.14

Tabla 2.

se puede hablar de varias decenas de Gy por tratamiento.

El porcentaje de dosis debidas al diagnóstico médico crece con el desarrollo del país, tal y como podemos ver en los datos de dosis efectiva anual per cápita en EEUU en 2006 (tabla 2).

Aproximadamente sólo un 25% de la población mundial vive en países con nivel I de sanidad (países con al menos un médico especialista por cada 1000 habitantes), pero es la población que más dosis recibe (figura

1) debido a las innumerables, consolidadas y netamente beneficiosas aplicaciones diagnósticas y terapéuticas de las radiaciones ionizantes en medicina.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica en su publicación número 60 hace énfasis en la necesidad de realizar procesos de optimización de dosis en el caso del paciente, ya que en el campo de las aplicaciones médicas existe un gran potencial para lograr una disminución de la dosis colectiva.

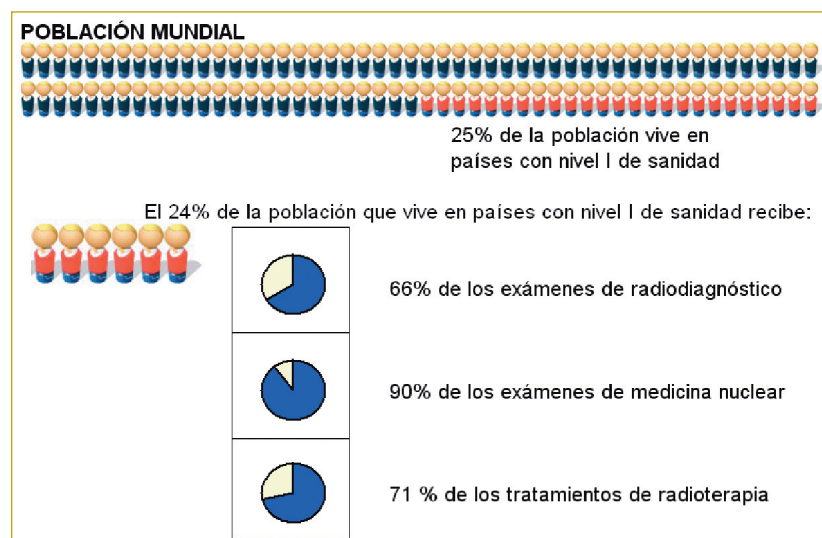


Figura 1: Un pequeñísimo porcentaje de la población mundial recibe la mayor parte de la dosis de radiación debido a las aplicaciones diagnósticas y terapéuticas de la radiación.

El principio de justificación establece que los procedimientos se harán basándose en un beneficio neto suficiente, teniendo en cuenta los beneficios diagnósticos y terapéuticos, incluidos los directos para la salud de las personas y para la sociedad, frente al detrimento individual. La legislación establece que no se puede realizar ninguna exposición médica, ni de voluntarios que colaboran en el confort del paciente que no esté debidamente justificada, teniendo en cuenta las posibles técnicas alternativas que no impliquen el uso de radiaciones ionizantes, y prestando una especial atención a la justificación cuando no haya un beneficio directo para la persona expuesta. Los criterios de justificación deben ser especialmente rigurosos en procedimientos pediátricos, dado el mayor riesgo para los niños de aparición de efectos radioinducidos y en el caso de mujeres gestantes.

Se debe subrayar que no existe límite de dosis para las exposiciones médicas, pero en el caso de procedimientos diagnósticos se está haciendo un gran esfuerzo para que existan valores de dosis de referencia en radiodiagnóstico, y de actividad administrada para los procedimientos más habituales en Medicina Nuclear. Estos valores no tienen carácter de límites, sino de niveles de investigación, y no son aplicables a un paciente individual sino a valores promedio de dosis de una muestra de pacientes. En el caso de radiodiagnóstico existen valores de referencia para las exploraciones más habituales, y para las que no existen se deben establecer en cada instalación. La superación de dichos valores puede indicar un mal funcionamiento del equipo o una mala práctica.

PROCEDIMIENTOS DE RADIODIAGNÓSTICO E INTERVENCIONISMO

Actualmente se estima que se realizan aproximadamente 3.600 millones de exámenes diagnósticos con RX anualmente en el mundo. El 24% de la población que vive en países con nivel I de sanidad (que como hemos dicho cuentan con aproximadamente un 25% de la población mundial), recibe aproximadamente 2/3 de estos exámenes. La frecuencia de este tipo de exámenes es de 1609 por cada 1000 habitantes en países con nivel I de sanidad. De estos exámenes un 79% son estudios de Tomografía Computarizada (TC) y suponen un 47% de la dosis efectiva colectiva total debida a exámenes diagnósticos médicos. La dosis

efectiva colectiva anual por exámenes de radiodiagnóstico es de aproximadamente 4.000.000 Sv/hombre, de los que aproximadamente 3/4 corresponden a países con nivel I de sanidad.

Los procedimientos con RX han ido creciendo a la vez que los nuevos avances tecnológicos, por ejemplo en el Reino Unido, en los últimos diez años, el número de procedimientos con TC se ha incrementado en un 140%, representando el 68% de la dosis que recibe la población por la totalidad de los procedimientos con RX.

El objetivo de obtener una imagen diagnóstica con la mínima dosis de radiación, ha marcado la gran evolución de los equipos de radiodiagnóstico. En los últimos años en los Servicios de Radiodiagnóstico se ha pasado de una tecnología analógica a una digital, no solo en los sistemas de adquisición de la imagen sino también en la comunicación y archivo de la misma (PACS), lo que permite una gran eficiencia a la hora de gestionarla.

En la radiología simple, la digitalización de la imagen tuvo una primera etapa de transición, en la que se cambiaron los sistemas de adquisición y registro, sustituyendo el conjunto cartulina-película por sistemas CR (radiografía computarizada) en los que el detector era un fósforo fotoestimulable. En la actualidad, el cambio afecta a todo el equipo de RX, con detectores de panel plano (flat panel) de ICs o Se-amorfo, que permiten la obtención directa (sin un proceso externo de lectura) de la imagen digital.

La digitalización también ha llegado a las pruebas especiales (estudios gastroduodenales, enemas opacos, etc.) y al control intraoperatorio mediante RX utilizando arcos quirúrgicos. Los nuevos detectores de panel

plano están sustituyendo la imagen fluoroscópica tradicional mediante intensificadores de imagen, por imágenes digitales.

Pero como hemos dicho anteriormente la introducción de la TC supuso una gran revolución en el diagnóstico con RX. Tras los TC secuenciales aparecieron los TC helicoidales en los que la mesa avanza simultáneamente con la rotación del tubo y el tiempo de estudio se reduce de manera drástica. En la actualidad se dispone de TC multicorte (MSCT) (figura 2), donde en cada giro del tubo de RX y detectores se pueden adquirir 20, 40, 64, 128, y hasta 320 cortes, lo que supone la posibilidad de poder obtener un gran número de imágenes en tiempos muy cortos, y la reconstrucción en 3D. Esta nueva tecnología ha abierto la posibilidad de realizar estudios cardíacos y vasculares con TC (figura 3), colonoscopias virtuales, etc..

Un caso especial dentro de los procedimientos con RX, son los procedimientos intervencionistas o guiados por fluoroscopia, cada vez más presentes en los procedimientos clínicos de diferentes especialidades médicas: Cardiología, Radiología, Digestivo, Anestesia (unidad del dolor), etc. Los requisitos para su realización son más estrictos que para otros procedimientos, ya que la legislación exige que se realicen en equipos dedicados, y por profesionales con un segundo nivel de formación en protección radiológica específica para intervencionismo. Algunos de estos procedimientos son considerados de alta dosis, como en el caso de procedimientos vasculares y de hemodinámica. Estos procedimientos, que pueden ser diagnósticos y terapéuticos, como la coronariografía o la angioplastia, se caracterizan por su complejidad. Requieren largos

tiempos de escopia y un gran número de imágenes, lo que implica que la dosis de radiación, en algunas zonas de la piel del paciente, puede llegar a superar el valor de dosis umbral para la aparición de efectos deterministas.

Las exposiciones de participantes en programas de cribado para la salud deben ser especialmente justificadas, ya que son personas asintomáticas que participan de forma voluntaria en dichos programas. En la actualidad, en nuestro país, está implantado de forma generalizada el programa de cribado de cáncer de mama, cuyos beneficios son indiscutibles en mujeres mayores de cincuenta años, y está en vías de implantación el programa de cribado de cáncer de colon.

En el caso de exámenes con RX, una vez justificado el procedimiento, y establecido el valor de dosis de referencia es necesario aplicar el principio de optimización para que las dosis sean tan bajas como razonablemente pueda alcanzarse (ALARA), de acuerdo a una información diagnóstica suficiente. Esto conlleva que el proceso de optimización incluya desde la elección del equipo y la técnica utilizada, hasta aspectos prácticos como el control de calidad, la valoración y evaluación de las dosis y de la calidad de imagen.

Para la estimación de las dosis recibidas en radiodiagnóstico se utilizan indicadores dosimétricos, como la dosis en la superficie de entrada del campo, el producto dosis área, el índice de dosis y el producto dosis por longitud en TC, o la dosis glandular promedio en mamografía.

La optimización de la dosis que se recibe en órganos fuera del campo de exploración en radiodiagnóstico, se realiza utilizando materiales de pro-



Figura 2. Equipo de MSCT.

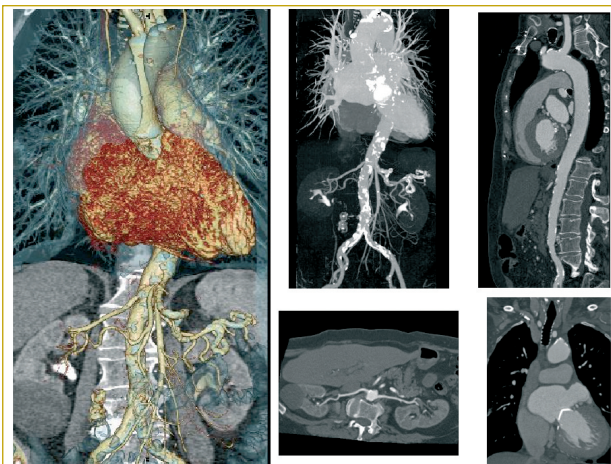


Figura 3. Imagen de un procedimiento vascular con MSCT.

tección adecuados o factores técnicos como colimaci. En el caso de radio-diagnóstico se utilizan protectores plomados como collarines de tiroides, protectores gonadales, protectores de Bi en TC, así como el posicionamiento correcto del paciente durante la exploración, que a veces requiere la inmovilización como en el caso del paciente pediátrico.

Se debe prestar especial atención a la protección de la paciente gestante. En general, los procedimientos diagnósticos con RX que no afecten a la región abdominal pueden realizarse protegiendo el abdomen con un delantal plomado, aunque en algunos casos, como en algunas exploraciones de TC, sea discutible su beneficio frente a la optimización de la dosis mediante los parámetros técnicos utilizados. En caso de que resulte expuesta la región abdominal el especialista justificará si se puede realizar el procedimiento, y se establecerán condiciones estrictas de optimización de dosis. El especialista en radiofísica hospitalaria realizará el estudio dosimétrico estimando la dosis recibida en útero por la paciente. El riesgo de efectos estocásticos o deterministas en el feto en exploraciones diagnósticas con RX es muy bajo.

PROCEDIMIENTOS DE MEDICINA NUCLEAR

Hay 33 millones de exámenes diagnósticos de medicina nuclear anualmente en el mundo. El 24% de la población que vive en países con nivel I de sanidad, recibe aproximadamente el 90% de estos exámenes. La frecuencia de este tipo de exámenes es de 19 por cada 1000 habitantes en países con nivel I de sanidad. Los procedimientos terapéuticos en medicina nuclear son 0.47 por cada 1000 habitantes en este tipo de países. La dosis efectiva colectiva total anual es de unos 202.000 Sv/hombre, de los que aproximadamente 186.000 corresponden a países con nivel I de sanidad. En Medicina Nuclear diagnóstica, la mayor contribución a la dosis efectiva colectiva proviene de las gammagrafías óseas con ^{99m}Tc , estudios cardiovasculares con ^{201}Tl , estudios de tiroides con yodo y, cada vez más, estudios de todo tipo con ^{18}F .

En Medicina Nuclear se administra al paciente un radionucleido unido a una molécula portadora como, por ejemplo, un azúcar o un fármaco. El estudio del lugar en el que se capta dicho portador, la intensidad de captación y el tiempo de captación y/o eliminación, da información diagnóstica muy valiosa sobre la actividad metabólica del paciente.

La forma de “ver” esta información metabólica es mediante el uso de gammacámaras. Estos equipos son capaces de generar imágenes bi o tridimensionales de la distinta captación del radiofármaco en los órganos o tejidos del paciente, a partir de la emisión gamma del radionucleido con el que está marcado. La detección de la emisión gamma en las gammacámaras se realiza gracias al cristal de NaI(Tl) que transforma la radiación γ en luz, la cual es detectada mediante una matriz de tubos fotomultiplicadores. La mayoría de la gammacámaras comerciales actuales cuentan con más de un cabezal (cada uno con su cristal de NaI(Tl) y su conjunto de tubos fotomultiplicadores), lo que permite adquisiciones mucho más rápidas. Las adquisiciones pueden ser de tres tipos:

- Estáticas: Imagen bidimensional de la actividad de los distintos órganos y tejidos del paciente desde un determinado ángulo de visión.
- Dinámica: Varias adquisiciones estáticas que permiten estudiar la variación temporal de la actividad en, por ejemplo, riñones.
- Tomográfica: La gammacámara rota alrededor del paciente permitiendo reconstruir imágenes tridimensionales de la captación de actividad en el paciente.

La administración de la actividad al paciente suele realizarse por inyección, aunque también por ingestión o por inhalación, dependiendo del estudio.

La capacidad del portador para captarse de forma muy específica en determinadas partes del cuerpo puede utilizarse también con fines terapéuticos, ya que se puede liberar una alta dosis de radiación de forma muy localizada. Así, aunque se puede destacar el uso del ^{131}I para el tratamiento del hipertiroidismo y del cáncer de tiroides, son múltiples las aplicaciones terapéuticas de la medicina nuclear (paliación del dolor en metástasis óseas, tratamiento de inflamaciones articulares, radioinmunoterapia, etc).

Los radionucleidos utilizados en Medicina Nuclear se producen en reactores nucleares, aceleradores de partículas o mediante generadores de radionucleidos (equipos que contienen radionucleidos “padres” de periodo largo que van generando radionucleidos “hijos” de corta vida que pueden separarse de forma sencilla para ser administrados a los pacientes). El radionucleido más utilizado es el ^{99m}Tc unido a una gran variedad de moléculas.

Hoy es muy frecuente que la obtención de imágenes en medicina nuclear se realice mediante SPECT (siglas del inglés para tomografía por emisión

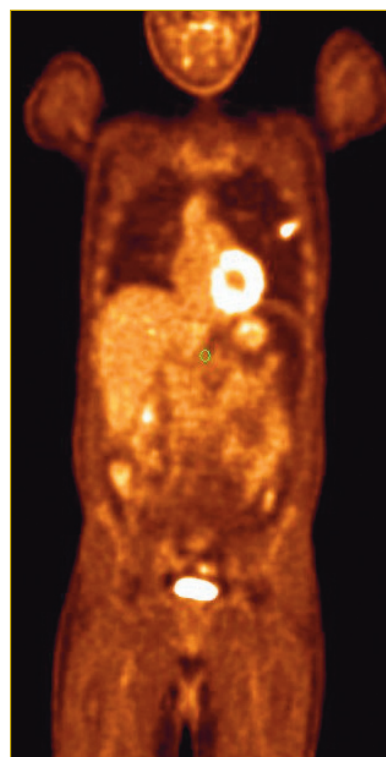


Figura 4: Imagen de la captación de F-18 unido a un azúcar en las distintas partes del cuerpo de un paciente. La mayor actividad captada en corazón y vejiga son normales. La mayor actividad que se ve en la zona de pulmón es patológica.

de fotones individuales) en la que uno o varios cabezales giran alrededor del paciente para obtener imágenes tridimensionales de la distribución de actividad dentro del paciente. En los equipos SPECT-CT se combina el SPECT con un CT que, además de la información que aporta en sus imágenes, ayuda a corregir la distorsión que produce la atenuación del propio paciente en la actividad medida.

La Medicina Nuclear se ha revolucionado en los últimos años con la introducción de las cámaras PET gracias a su buena resolución tomográfica, sensibilidad y a su extraordinaria capacidad para rastrear células malignas (figura 4) y la actividad del cerebro. PET son las siglas inglesas de tomografía por emisión de positrones. El radionucleido emisor de positrones más utilizado es el ^{18}F unido a un azúcar llamado FDG (fluor-2-deoxiglucosa). El positrón emitido interacciona rápidamente con un electrón y se produce la aniquilación de ambos en dos fotones de 511 keV de energía que son emitidos a 180º el uno del otro. La PET detecta estos pares en anticoincidencia mediante detectores espacialmente opuestos, que no son de ICs sino típicamente de BGO (Germanato de Bismuto) o LSO (ortosilicato de Lutecio).

Los equipos que combinan PET-CT son cada vez más comunes, ya que permiten la combinación y fusión de las imágenes de estas dos modalidades, es decir, un mapa tridimensional de actividad (PET) junto con información anatómica tridimensional muy precisa (TC).

Los Servicios de Medicina Nuclear son cada vez más multidisciplinares y es habitual que cuenten, además de con Médicos Especialistas en Medicina Nuclear y Técnicos Especialistas en diagnóstico por la imagen, con Radiofísicos hospitalarios (encargados del control de calidad de equipos e imágenes, así como de los aspectos de Protección Radiológica asociados al manejo de sustancias radiactivas no encapsuladas) o con Radiofarmacéuticos.

PROCEDIMIENTOS EN RADIOTERAPIA

Se realizan anualmente unos 5.1 millones de tratamientos de radioterapia (4.7 millones con radioterapia externa y 0.4 millones con braquiterapia) en todo el mundo. Hay unos 10000 aceleradores en todo el mundo, principalmente en los países con nivel I de sanidad, donde se realizan unos 2.4 tratamientos anuales por cada 1000 habitantes (el 24% de la población de estos países recibe el 71% de todos los tratamientos de radioterapia).

La radioterapia es el uso de la radiación para producir efectos citotóxicos sobre un determinado volumen del paciente (tumor con un cierto margen de seguridad), manteniendo la dosis en el resto de los órganos y tejidos tan baja como sea posible. Hay una diferencia pequeña, pero favorable, en la respuesta a la radiación de las células sanas respecto a las malignas. Las células malignas son más radiosensibles y esta pequeña diferencia en la respuesta a la radiación se puede amplificar si la radiación se libera en múltiples sesiones.

Hoy la radioterapia se imparte habitualmente de forma combinada con la cirugía, la quimioterapia o con ambas.

Los tratamientos con radiaciones que se realizan en oncología radioterápica pueden ser básicamente de dos tipos:

1. Teleterapia o radioterapia externa. Tratamiento mediante una fuente externa de fotones, electrones e incluso con protones.
2. Braquiterapia. Tratamiento mediante la colocación precisa y durante un tiempo establecido de fuentes radiactivas encapsuladas dentro o cerca de un tumor. El radionucleido más utilizado es el Ir-192 para todo tipo de localizaciones, seguido del I-125 para el caso de braquiterapia de próstata.

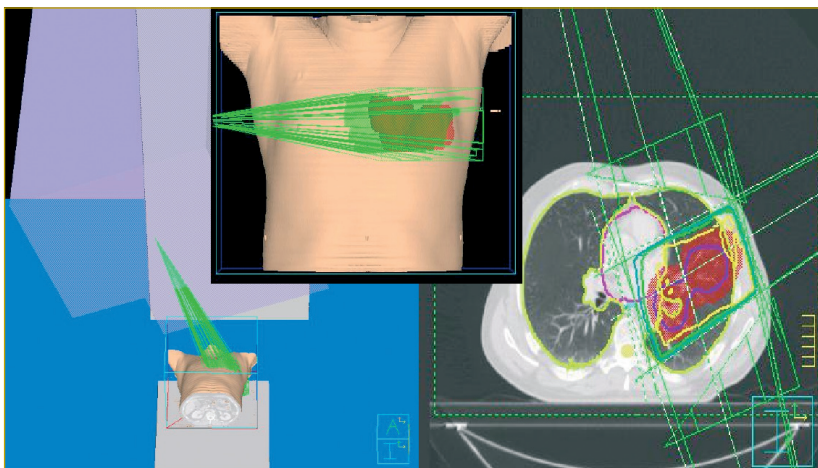


Figura 5. Tratamiento de Radioterapia. Múltiples haces de radiación inciden desde distintas angulaciones sobre el volumen a tratar.

En algunas patologías, como algunos cánceres ginecológicos y de próstata, es habitual realizar tratamientos combinados de teleterapia y braquiterapia.

Para la radioterapia externa se utilizan modernos aceleradores lineales que aceleran electrones hasta energías del orden de 6 a 25 MeV. Estos electrones pueden ser utilizados directamente o (lo que es más habitual) ser frenados para conseguir haces de fotones de alta energía. Habitualmente se trata al paciente con haces de radiación que tienen formas personalizadas y múltiples angulaciones específicas para cada tratamiento individual. Los pasos básicos habituales en un tratamiento radioterápico son:

1. Adquisición de imágenes de TAC del paciente en posición de tratamiento y con el sistema de inmovilización con el que se realizará el mismo. Cada vez más, se están utilizando modalidades de imagen complementarias como PET o Resonancia Magnética.
2. Delimitación en el o los conjuntos de imágenes del volumen blanco y de los posibles órganos de riesgo.
3. Prescripción de la dosis de tratamiento, el fraccionamiento con el que debe impartirse y las limitaciones en cuanto a dosis y volumen irradiado en los órganos de riesgo.
4. Dosimetría clínica o planificación del tratamiento.
5. Tratamiento.
6. Seguimiento del paciente

En realidad, hay muchas más etapas y cada una de ellas se puede subdividir a su vez en otras muchas, pero podríamos decir que éstas son las 6 etapas básicas. El Oncólogo Radioterapeuta se encarga básicamente de las etapas 2, 3 y 6, los Técnicos Especialistas en Oncología Radioterápica se encargan básicamente de las etapas 1 y 5 y los Radiofísicos Hospitalarios

se encargan básicamente de la etapa 4 además del control de calidad del equipamiento utilizado para la planificación y tratamiento de los pacientes, de la elaboración y revisión continua de los protocolos asociados, así como de la puesta en marcha de nuevas técnicas de tratamiento para la mejora de la calidad de los mismos.

La planificación de los tratamientos se lleva a cabo en sistemas informáticos con una gran capacidad de cálculo. Los planificadores podríamos decir que son simuladores. Estos programas pueden simular:

1. Las características exactas y particulares de los equipos de radiación de cada Servicio de Oncología Radioterápica.
2. La interacción de la radiación con el paciente.
3. La geometría del paciente (mediante imágenes TAC del paciente).

Así, se puede simular el resultado del tratamiento con múltiples haces que incidan desde múltiples ángulos o comparar las distintas distribuciones de dosis de uno o más planes. Es decir, el proceso de planificación es la tarea de decidir cómo tratar a un paciente virtual con una máquina virtual, trabajando siempre de modo que la simulación sea lo suficientemente buena como para que el paciente real, tratado con la máquina real, reciba la distribución de dosis que se ha planificado (figura 4).

Se ha avanzado mucho en los últimos años en mejorar las técnicas para conseguir distribuciones de dosis en los pacientes mucho más conformadas y precisas (IMRT - Radioterapia con Intensidad Modulada-) y en ver y seguir mediante imágenes durante el tratamiento, el volumen que se desea tratar (IGRT - Radioterapia Guiada por la Imagen). La IMRT se basa en impartir la dosis mediante múltiples

segmentos de radiación, pudiendo además, según de qué técnica de IMRT se trate, variar la tasa de dosis, el ángulo de giro, la velocidad de giro del acelerador alrededor del paciente, etc. Se consiguen así muchos grados de libertad en la irradiación, lo que permite conformar de forma muy precisa las curvas de isodosis al volumen de tratamiento, preservando los órganos de riesgo. Para la IGRT se ha dotado a los aceleradores de sistemas de imagen que permiten obtener imágenes del paciente en posición de tratamiento, por ejemplo, mediante sistemas de imagen portal que permiten obtener imágenes de proyección e imágenes en movimiento o cone beam CT que permiten obtener reconstrucciones tomográficas o 3D.

En los tratamientos radioterápicos se intenta que la dosis de radiación que se imparte a los pacientes sea lo suficientemente alta como para conseguir una probabilidad de control tumoral adecuada. Sin embargo, las dosis están limitadas por la tolerancia de los órganos y tejidos sanos, en los cuales se intenta que la tasa de complicaciones debidas a la irradiación sea suficientemente baja. La evolución tecnológica está permitiendo incrementar las dosis gracias al mayor grado de conformación de la dosis al volumen de tratamiento que permiten técnicas como la IMRT y mediante una mayor certidumbre en la liberación de la dosis en el volumen exacto deseado que permiten las técnicas de radioterapia guiada por la imagen (IGRT) o de radioterapia estereotáxica (SRS, SBRT). Un exceso de dosis o una distribución de la dosis en una localización inadecuada podrían suponer un aumento de las complicaciones debidas al tratamiento. Por el contrario, una dosis inferior a la prescrita se puede traducir en una disminución de la probabilidad de control tumoral. Por tanto, cualquier error (tanto por exceso como por defecto) puede ser crítico y puede afectar de manera significativa a los pacientes sometidos a procedimientos radioterápicos.

El proceso radioterápico implica una sucesión de actuaciones en las que interviene un grupo multidisciplinar de profesionales. El tratamiento se fracciona habitualmente en unas 30 sesiones en promedio (aunque el número de sesiones varía mucho según el tipo de tratamiento), cada una de las cuales requiere la selección de un número elevado de parámetros. Cada día se tratan muchos pacientes, cada uno de ellos con parámetros similares pero diferentes, lo cual propicia la posibilidad de cometer errores humanos. Los errores que se han descrito han tenido frecuentemente consecuencias devas-

tadoras e incluso fatales. Por ello es fundamental llevar a cabo un control muy exhaustivo del equipamiento, verificar independientemente los parámetros más importantes y designar procedimientos y procesos con menores probabilidades de fallo. En estos aspectos se está intentando aprender de la experiencia de la industria nuclear y de la navegación aérea, donde procesos complejos se han diseñado para que sean cada vez más seguros.

VOLUNTARIOS QUE COLABORAN EN EL CONFORT DEL PACIENTE

Merece destacarse por lo novedoso de su inclusión en el ámbito de aplicación de la protección radiológica en exposiciones médicas a la protección de personas que, habiendo sido informadas y habiendo dado su consentimiento, colaboran de manera independiente de su profesión en la ayuda y bienestar de personas que están sometidas a exposiciones médicas. En el caso de procedimientos diagnósticos con RX, estas personas pueden colaborar en la inmovilización del paciente, crítica en el caso de pacientes pediátricos. Se les debe de proporcionar material de protección, como delantales plomados y recibir información para que la dosis que reciban sea la mínima posible.

En el caso de procedimientos terapéuticos con ¹³¹I en Medicina Nuclear, las personas que colaboran en su confort no solo tienen riesgo de irradiación sino también de contaminación por lo que las normas de actuación deben tener en cuenta estos riesgos. La Comisión Europea ha publicado una guía de recomendaciones, y ha establecido dosis restringidas para este colectivo.

CONCLUSIONES

Las aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes son cada vez más diversas e importantes en la medicina actual. Estas aplicaciones representan el mayor porcentaje de la dosis colectiva, especialmente en los países más desarrollados. En los últimos años se ha realizado un gran esfuerzo legislativo para asegurar el cumplimiento de los principios de protección radiológica tanto en exposiciones ocupacionales y del público como en las exposiciones médicas que, acompañado de grandes avances tecnológicos, ha incrementado el nivel de protección en los procedimientos clínicos con radiaciones ionizantes. Para garantizar la seguridad y nivel de protección, se debe seguir trabajando en mejorar la justificación y optimización de estos procedimientos mediante la formación continuada de los profesionales, y la información del público

BIBLIOGRAFÍA

1. UNSCEAR 2008. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly. Anexo A: Medical radiation exposures. Volumen 1, 2010.
2. Real Decreto 1841/1997, de 5 de diciembre, por el que se establecen los criterios de calidad en Medicina Nuclear. BOE no 303: 37137-37143, 1997.
3. Real Decreto 1976/1999, de 5 de diciembre, por el que se establecen los criterios de calidad en Medicina Nuclear. BOE no 303: 37137-37143, 1997.
4. Real Decreto 1566/1998, de 17 de julio de 1998, por el que se establecen los criterios de calidad en radioterapia. BOE no 206: 29383-29394, 1998.
5. Real Decreto 815/2001, de 13 de julio de 2001, sobre justificación del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas. BOE no 168:25591-25594, 2001
6. Nuclear Medicine Resources Manual (2006) IAEA. Descargable en: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1198_web.pdf
7. Comisión Europea. Guía sobre los niveles de referencia para diagnóstico (NRD) en las exposiciones médicas. Protección Radiológica 109. Comunidades Europeas, Luxemburgo, 1999. ISBN 92-828-7774-4.
8. European Commission. European Guidelines on radiation protection in dental radiology. The safe use of radiographs in dental practice. Radiation Protection 136. European Communities, Luxembourg, 2004. ISBN 92-894-5958-1.
9. Comisión Europea. Criterios para la aceptabilidad de instalaciones radiológicas (incluyendo radioterapia) y de medicina nuclear. Protección Radiológica 91. Comunidades Europeas, Luxemburgo, 1999. ISBN 92-828-1138-7.
10. Comisión Europea. Protección radiológica después de una terapia con I-131. (Exposición debida al contacto con pacientes ambulatorios o dados de alta). Protección Radiológica 97. Comunidades Europeas, Luxemburgo, 1999. ISBN 92-828-5269-5.
11. ICRP. Publication 60 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Ann. ICRP 21 (1-3) ■