

PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN EL PACIENTE

por

M.^a CRUZ LIZUAIN ARROYO

Jefe de la Sección de Física. Hospital de Bellvitge «Príncipes de España»
Hospitalet de Llobregat - Barcelona

Introducción

La utilización de los Rayos X en Medicina con fines diagnósticos comienza en 1895, sólo unos meses más tarde de su descubrimiento por RÖNTGEN.

En 1896, un médico francés los emplea en el tratamiento de un cáncer de estómago, disputándose la paternidad de la Radioterapia, con un americano, fabricante de tubos de rayos X, que viendo las lesiones que se producían en su mano izquierda, frecuentemente expuesta a los rayos X, tuvo la idea de irradiar un cáncer de mama, protegiendo el resto del cuerpo con una pantalla de plomo, realizando así el primer acto de Radioprotección de la historia.

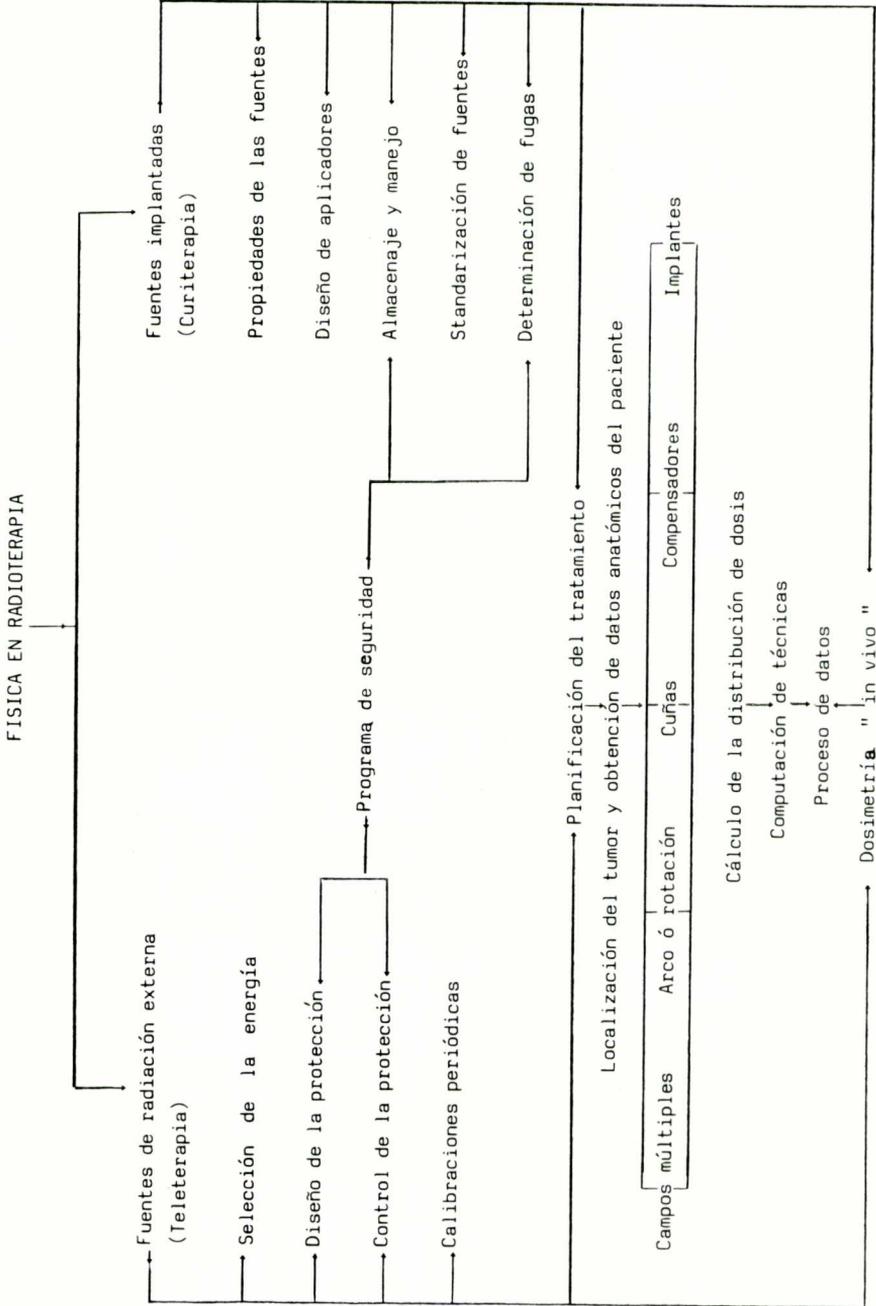
Ese mismo año BECQUEREL descubre la radiactividad natural y dos años más tarde los CURIE el radio. En 1901 se realiza en París la primera aplicación de este elemento radioactivo en un lupus eritematoso, y en 1905 en EE. UU. se realiza la primera Curiterapia intersticial.

La utilización terapéutica del radio, se generaliza en la década de los 10, creándose instituciones tan importantes como el Instituto del Radio de París, el de Manchester o el de Estocolmo, dedicados a la investigación, en el campo del tratamiento de los tumores con radiaciones ionizantes.

Un paso importante fue el descubrimiento por los JOLIOT-CURIE, de la radiactividad artificial, gracias al cual se han podido obtener una serie de nuevos elementos radiactivos de amplia utilización terapéutica como el Co-60, I-131 o diagnóstica como el Tc-99.

A partir de aquí, la evolución de la aplicación de las radiaciones ionizantes en Medicina ha seguido un camino paralelo al de los descubrimientos realizados por la Física en este campo, incorporando para su uso en clínica, no sólo los nuevos equipos productores de radiaciones, como aceleradores de partículas, etc., sino los métodos de medida, detección y dosificación de la energía, desarrollados hasta ahora.

Las radiaciones ionizantes al interaccionar con la materia viva, producen reacciones químicas en los componentes de la célula, que pueden llevar a cambios importantes en su estructura y en algunos casos causar su destrucción.



Los efectos biológicos de las radiaciones suponen un riesgo para las personas, que ya sea en el ejercicio de su profesión o con ocasión de exploraciones o tratamientos, se ven expuestos a una irradiación.

La limitación y control de estos efectos biológicos da lugar a una serie de técnicas de Radioprotección aplicable no sólo a los profesionales que manipulan los equipos productores de radiaciones, sino también a los pacientes que las han de recibir.

Al hablar de estos métodos de Radioprotección, se han de considerar por separado, las dos áreas de aplicación de las radiaciones ionizantes en Medicina, la terapéutica, que da lugar a la especialidad llamada Radioterapia, y la de diagnóstico correspondiente a las especialidades de Radiología y Medicina Nuclear.

Radioterapia

La Radioterapia es el tratamiento de los tumores malignos (cáncer) con radiaciones. El tratamiento de estos tumores supone suministrar dosis altas (la dosis se define como la energía absorbida por unidad de masa) durante un cierto período de tiempo a una zona localizada del organismo donde se encuentra el tumor. Como sólo se irradia un pequeño volumen y como las dosis totales se administran en pequeñas fracciones diarias, se pueden dar dosis totales del orden de 40 a 60 Gy (4.000 a 6.000 rad), y aún mayores, sin producir ninguno de los síndromes de irradiación, ni la muerte. (Se considera que una dosis única de 3 Gy dada a todo el organismo produce la muerte en el 50 % de los casos.)

El objetivo pues de la Radioterapia es la esterilización del tumor produciendo una mínima destrucción del tejido sano que lo rodea. Esto no es siempre fácil, ya que la interacción de la radiación con los tejidos es un proceso aleatorio, no específico de las células tumorales. El volumen de tratamiento abarca no sólo el tumor, sino también el tejido normal que lo rodea; además, la radiación es suministrada, en la mayoría de los casos, por fuentes externas al organismo, y parte de ella es absorbida por los tejidos que atraviesa en su camino hasta el tumor, lo que implica un importante riesgo que sólo es aceptable debido a la gravedad de las enfermedades que son tratadas con Radioterapia.

A lo largo de estos años de aplicación de las radiaciones, los departamentos de Física de los Hospitales, en colaboración con los radioterapeutas, han desarrollado un conjunto de técnicas que tienen como finalidad el mejorar la selectividad de la radiación y por lo tanto disminuir el riesgo del tratamiento.

La Radioterapia utiliza una amplia gama de radiaciones ionizantes, cuyas características principales y forma de producción son enumeradas en la TABLA I.

Algunas como las partículas α , los neutrones y los mesones π , son empleadas solamente en programas de investigación y no de forma rutinaria.

La técnica de irradiación más frecuentemente utilizada es la llamada Radioterapia externa transcutánea, en la que la fuente de radiación permanece a una

TABLA I
RADIACIONES IONIZANTES UTILIZABLES EN RADIOTERAPIA

NATURALEZA	PRODUCCION	ENERGIA	ALCANCE MEDIO EN LOS TEJIDOS
Radiación X	Tubos de RX Aceleradores Elementos Radiactivos	10eV-45MeV	- Variable con la energía - 200KV ; 50% de la dosis a 7cm de profundidad.
Radiación γ	Elementos Radiactivos	Algunos KeV-2MeV	- Variable con la energía - 60-Co : 50% de la dosis a 10cm de profundidad.
Electrones Acelerados	Aceleradores	5MeV-45MeV	- Variable con la energía - e ⁻ 25MeV ; 50% de la dosis a 8cm de profundidad.
Radiación β	Elementos Radiactivos	Algunos KeV-2MeV	- Algunos milímetros
Radiación α	Elementos Radiactivos	1MeV	- Fracciones de milímetro
Neutrones	Aceleradores	Algunos KeV-10MeV	- Variable con la energía - 50% de dosis a 7cm para 6MeV
Mesones π	Aceleradores	Variable hasta 46MeV	- Variable con la energía

cierta distancia del paciente; la telecobaltoterapia en un ejemplo de este tipo de tratamientos.

Los equipos de cobaltoterapia, llamados vulgarmente bombas de cobalto, (figura 1) contienen una fuente de cobalto ^{60}Co , elemento radiactivo artificial, de pequeño volumen ($\approx 3 \text{ cm}^3$) y una actividad entre 4.000 y 10.000 Ci. La fuente está encerrada en una cápsula de tungsteno y acero, con el fin de eliminar el riesgo de contaminación. El conjunto permanece dentro de un bloque de plomo o de uranio empobrecido, llamado cabezal del equipo. En el momento del tratamiento y mediante un sistema de movimiento, que depende del modelo de que se trate, la fuente queda situada frente a un orificio del cabezal, por el cual emerge un haz de radiación. Este haz de radiación gamma, es colimado por medio de unos diafragmas móviles.

Otro de los equipos también muy empleado en la actualidad, en el tratamiento de los tumores, es el acelerador lineal de electrones. El de la figura n.º 2 produce haces de electrones de energías variables hasta 20 MeV y Rayos X de 18 MV. El esquema de funcionamiento es el siguiente: un haz de electrones focalizado mediante un sistema de lentes electromagnéticas es acelerado al pasar por una serie de cavidades resonantes alimentadas por una señal de alta frecuencia. Al final del tubo de aceleración, los electrones pueden incidir sobre un blanco de tungsteno y producir un haz de rayos X de alta energía, o bien, ser utilizados directamente.

Al igual que el equipo de cobalto, está dotado de diafragmas móviles que permiten variar las dimensiones del haz de radiación. Los cabezales de los equipos de Radioterapia tienen un movimiento de giro alrededor de un eje, donde se situaría el paciente; este movimiento complementado con los de la mesa de tratamiento, permite que el haz de radiación incida en el paciente desde cualquier ángulo. Además existe todo un conjunto de accesorios con los que es posible modificar el haz de radiación, con el fin de conseguir una distribución idónea de la energía en el volumen de tratamiento.

Las salas de emplazamiento de estos aparatos son habitaciones especiales con paredes de hormigón cuyos espesores (superiores a 1 metro en la mayoría de los casos) se calculan en función de la energía de la radiación producida y con la condición de que la dosis recibida por el personal encargado de su manejo esté por debajo de la máxima admisible. Las máquinas se controlan desde una consola de mandos que permanece fuera de la habitación, y la vigilancia del paciente se efectúa por medio de una cámara de TV (figura 3).

La calidad del tratamiento efectuado con radiaciones depende directamente de la exactitud con la que es posible establecer la dosis absorbida en todos los puntos de interés del volumen irradiado, y como primer paso para la evaluación de la dosis, es necesario hacer un estudio cualitativo y cuantitativo del haz de radiación, lo que implica la calibración periódica (la periodicidad depende del grado de estabilidad) de la unidad generadora de radiación.

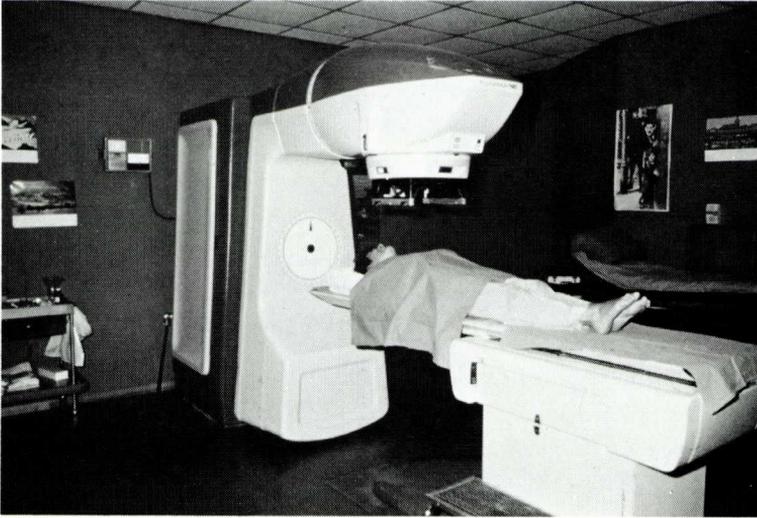


Figura 1

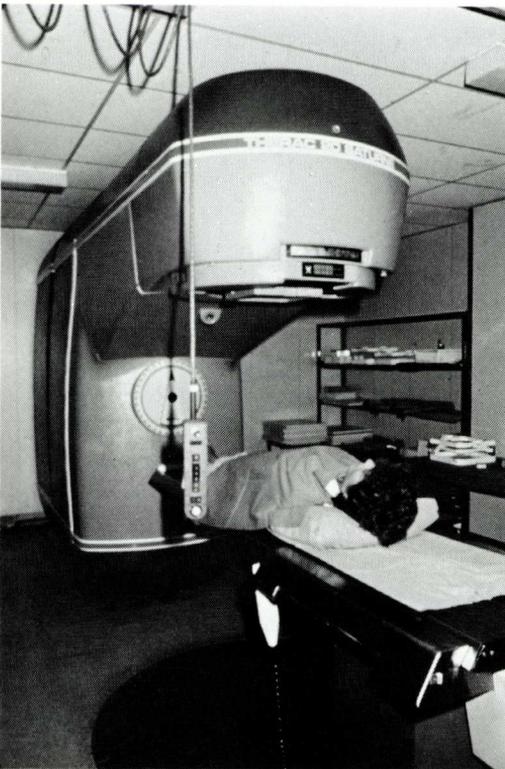


Figura 2

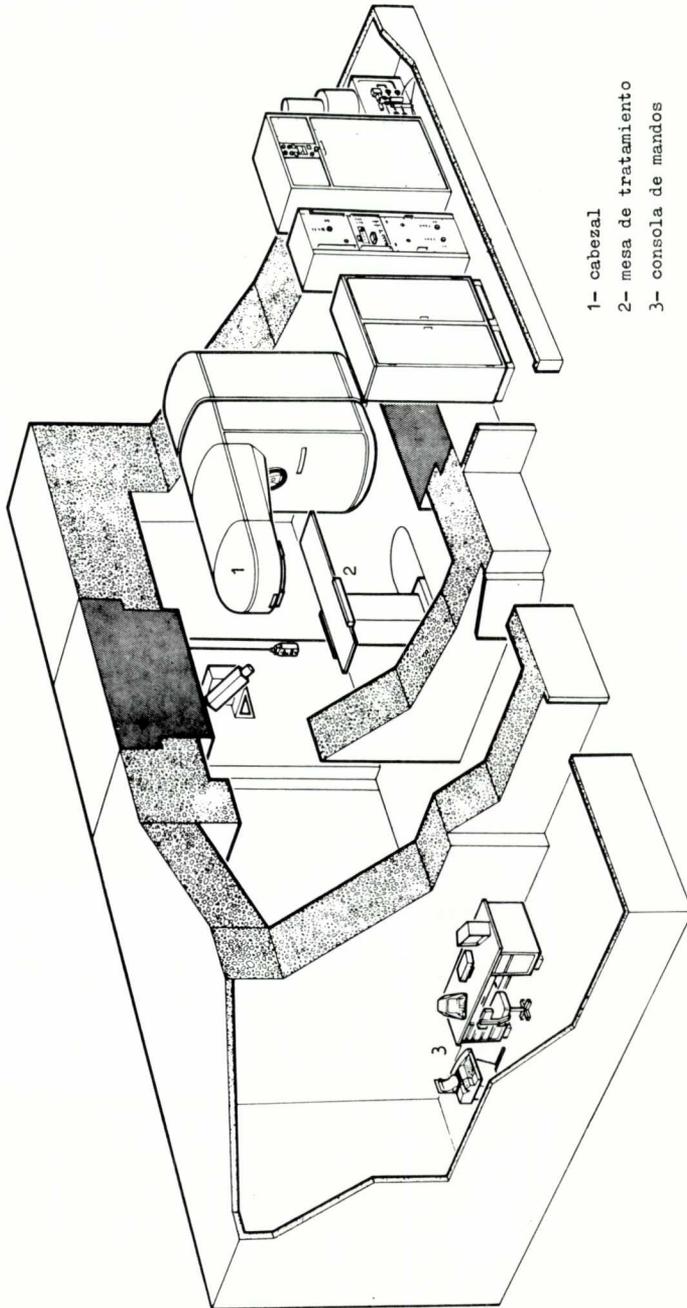


Fig. 3. - Emplazamiento de una unidad de tratamiento de alta energía.

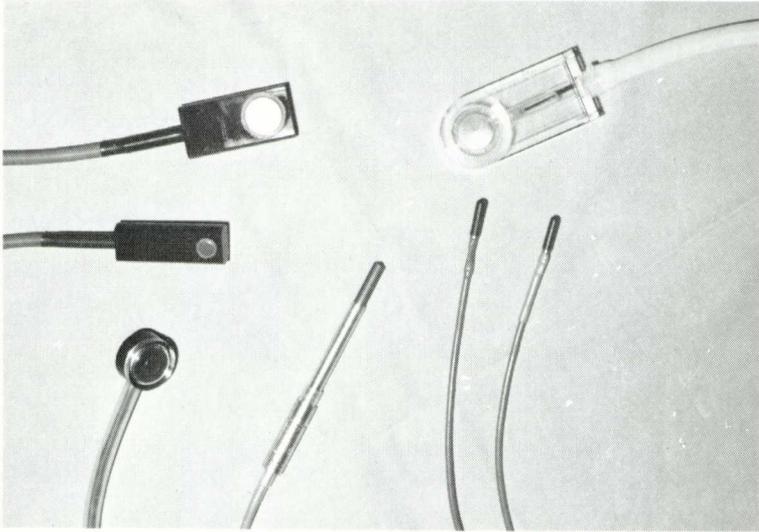


Figura 4

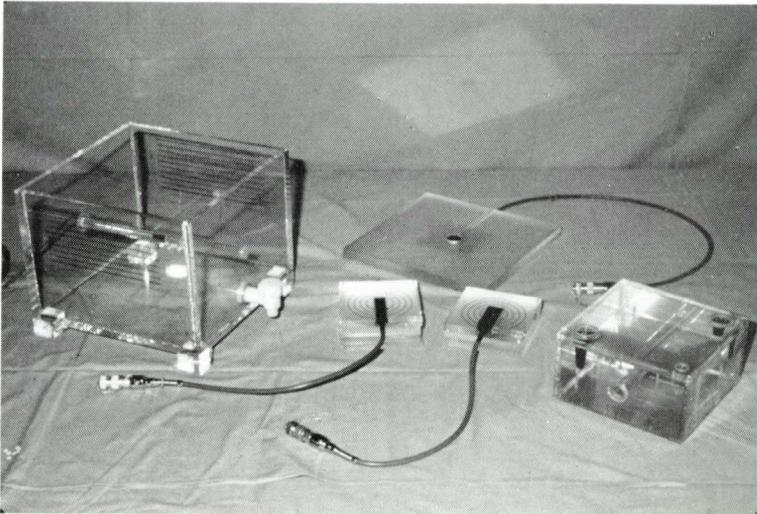


Figura 5

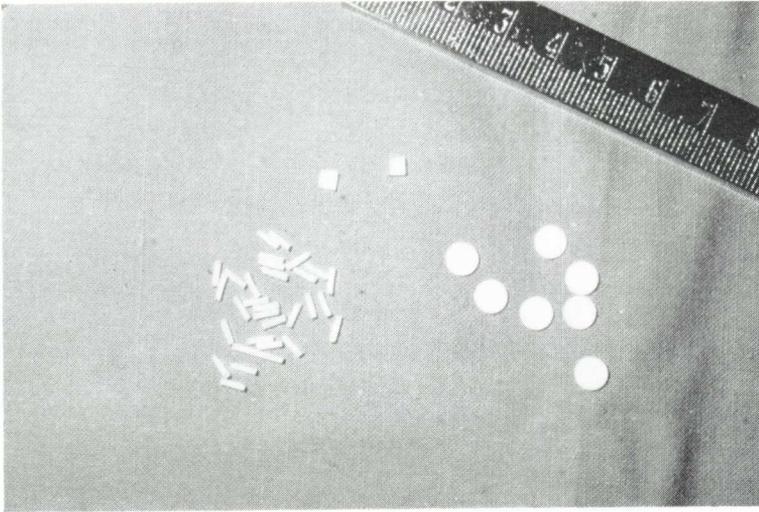


Figura 6

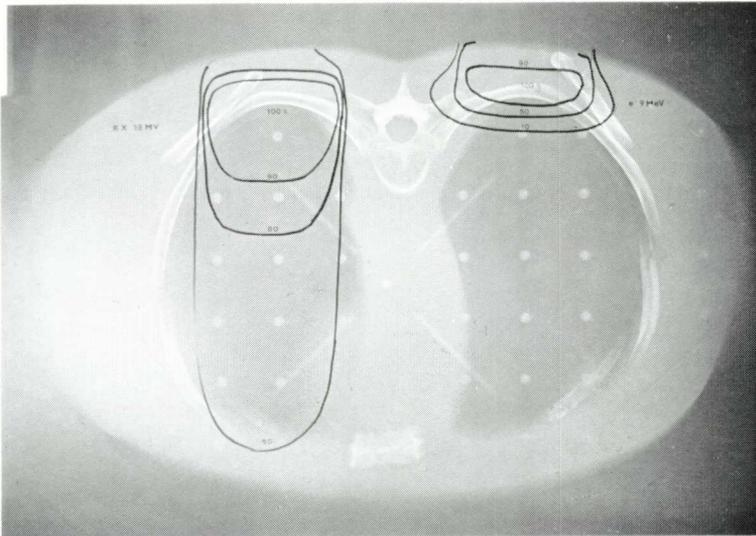


Figura 7

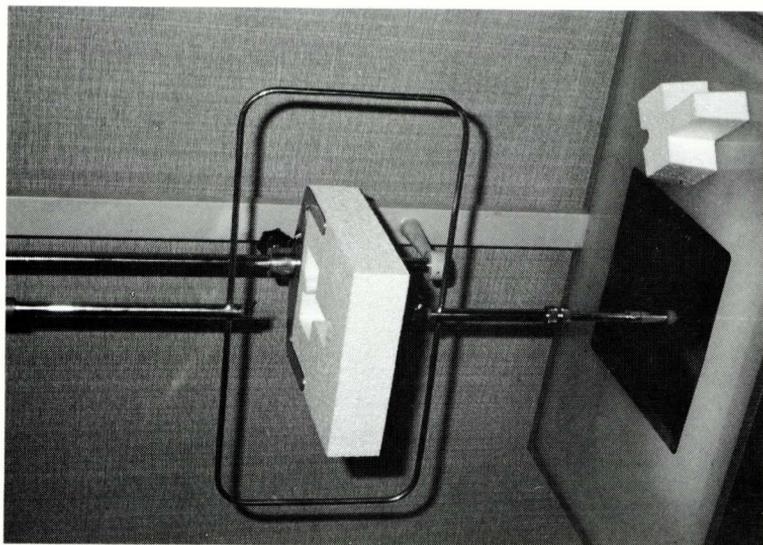


Figura 9

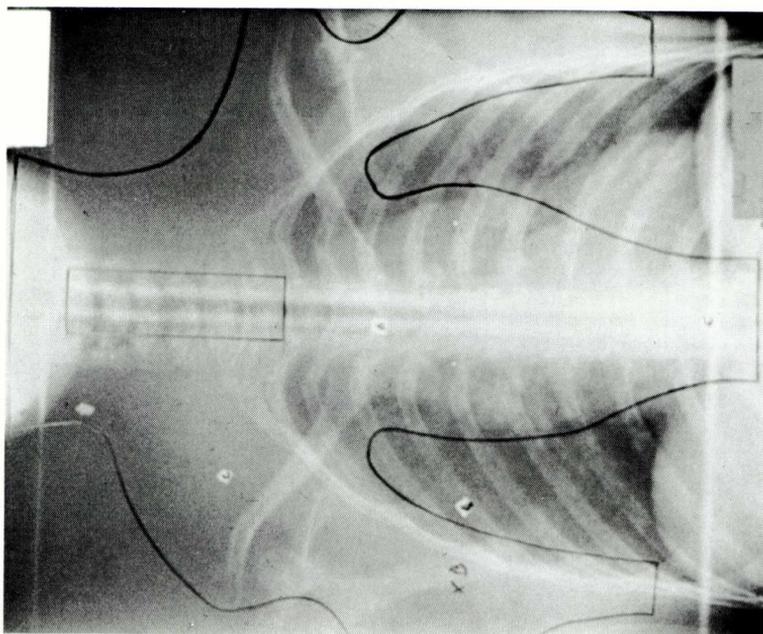


Figura 8

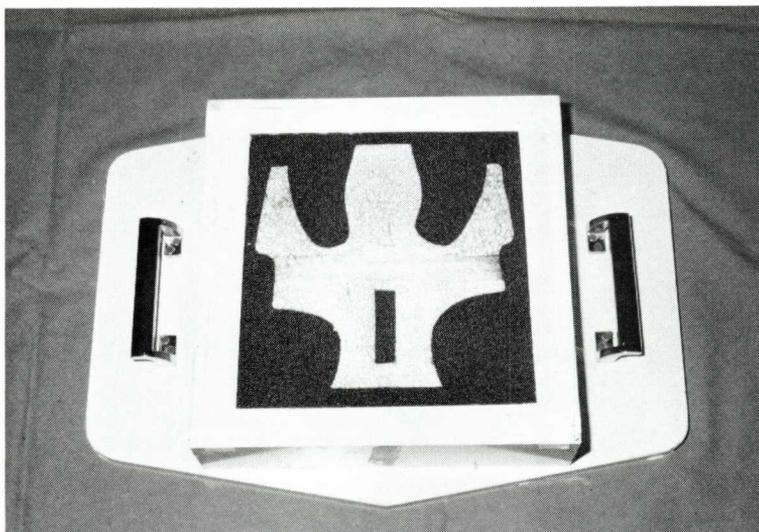


Figura 10

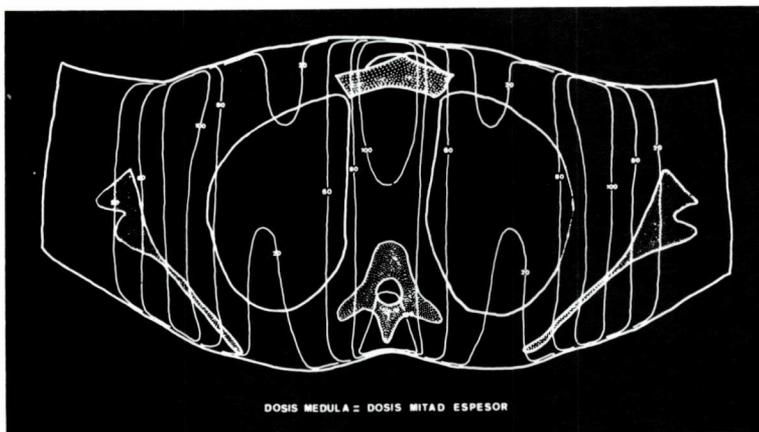


Figura 11

En el cuadro siguiente se ennumeran los parámetros que se han de determinar:

CALIBRACIÓN DE UNA UNIDAD GENERADORA DE RADIACIONES IONIZANTES

- Estudio de la geometría del haz de radiación:
 - Determinación de los ejes del haz
 - Campo de radiación
 - Fuente efectiva
 - Verificación de la homogeneidad
- Determinación de la energía del haz de radiación:
 - Fotones
 - Electrones
- Determinación de la dosis absorbida en el medio irradiado
- Obtención de distribuciones de dosis (isodosis)

Para la medida de estos parámetros se utilizan películas radiográficas, cámaras de ionización (fig. 4) de distintos materiales y volúmenes según la energía que se ha de medir, detectores semiconductores y detectores termoluminiscentes (fig. 5). La simulación del medio irradiado se efectúa con materiales de densidades equivalentes a tejido humano blando. Para ello se utilizan maniqués de agua, poliestireno, metacrilato, etc., con cavidades adaptadas al tipo de detector utilizado (fig. 6).

Con estos sistemas se obtienen mapas de distribuciones de dosis en planos principales del haz de radiación y en medios homogéneos. Las líneas del mapa son las curvas de isodosis expresadas en porcentajes respecto a la máxima dosis absorbida.

Con las curvas de dosis obtenidas se generan ficheros que se utilizarán como datos de partida en el cálculo de la distribución de la energía en el paciente.

Conocidas las características físicas de los haces de radiación, se trata de encontrar la mejor técnica de tratamiento, siempre con la condición de que el tumor reciba una dosis alta y homogénea, minimizando la dosis en los tejidos sanos que lo rodean, para lo cual es imprescindible hacer una planificación cuidadosa del tratamiento, partiendo de los datos anatómicos de cada paciente.

Los pasos a seguir en esta planificación, están resumidos en el siguiente cuadro.

PLANIFICACIÓN DEL TRATAMIENTO

- Localización del volumen tumoral
- Establecimiento de un sistema de referencia en el paciente
- Situación relativa del volumen tumoral y órganos críticos
- Representación gráfica de alguna sección de interés del volumen a irradiar
- Elección de la energía
- Elección de la técnica y diseño de modificadores del haz
- Obtención de la distribución de la dosis en los diferentes planos de estudio o en volumen
- Dosis total y tiempo de administración (Fraccionamiento)
- Verificación del tratamiento.

Los datos anatómicos del paciente, localización del tumor, etc., se pueden obtener por distintos métodos: radiografías, tomografías, aunque el mejor actualmente es la tomografía axial computerizada (T.A.C.), ya que además de que se logran imágenes con una gran exactitud en la forma y situación relativa de los órganos, es capaz de proporcionar información sobre la densidad electrónica de los diferentes tejidos, lo cual facilita el cálculo de la distribución de la dosis absorbida.

A continuación se presentan algunos ejemplos de distribuciones de dosis calculadas a partir de los datos del paciente, de los parámetros del haz de radiación e introduciendo las correcciones necesarias por las inhomogeneidades del tejido, etc.

FIGURA 7. — Esquema: sección transversal de un paciente a nivel de mediastino superior.

El volumen que se ha de irradiar es una metástasis en el arco costal posterior. El órgano crítico es el pulmón que ha de recibir la menor cantidad de dosis posible. Las curvas de isodosis están representadas en porcentajes respecto al máximo (100 %). La técnica de tratamiento con electrones (dcha. de la figura) es aceptable, ya que una pequeña parte del pulmón recibe entre el 10 y el 20 % mientras que en el tratamiento efectuado con Rayos X (izda. de la figura), todo el pulmón recibiría el 50 % de la dosis, por lo que se rechaza.

FIGURAS: 8, 9, 10, 11

Tratamiento del volumen supradiaphragmático en la enfermedad de Hodgkin. Se pretende irradiar las cadenas ganglionares más afectadas, protegiendo pulmones, laringe y tiroides; corresponde a la zona limitada por el trazo negro en la radiografía (fig. 8). Como los equipos de irradiación producen haces de

Figura 12

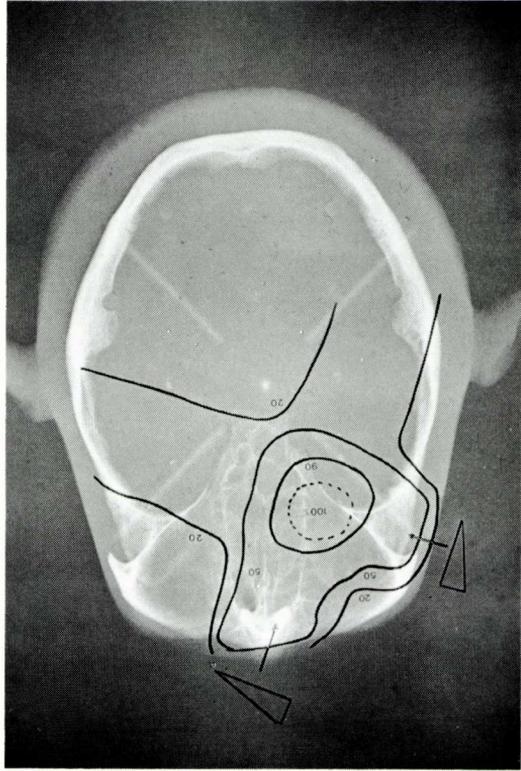
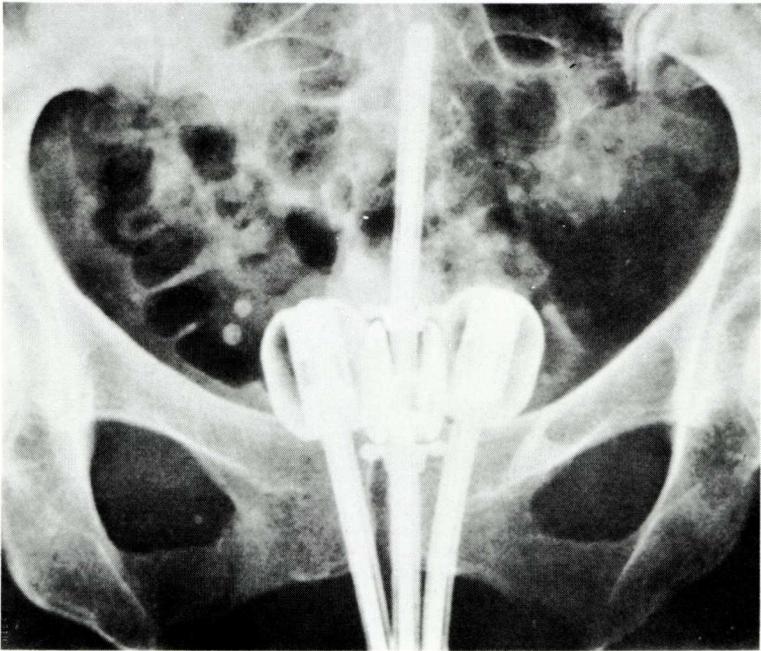


Figura 13



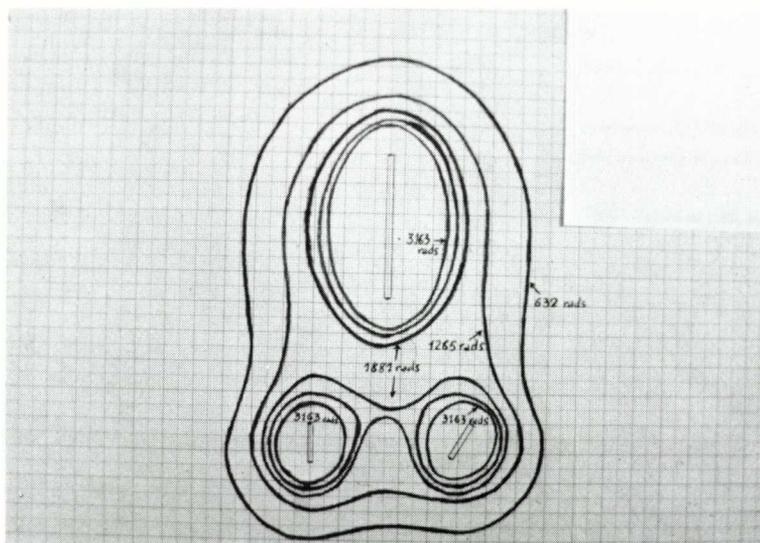


Figura 14

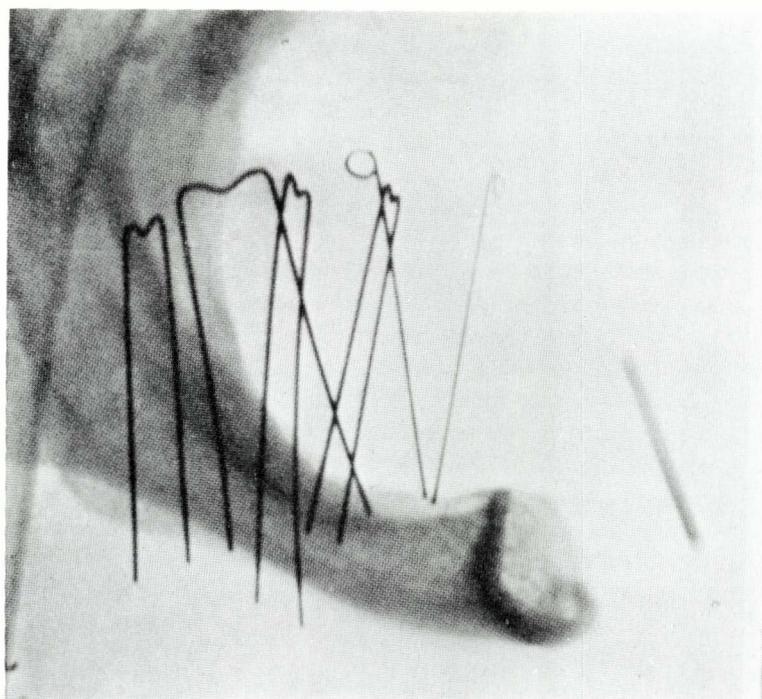


Figura 15

secciones rectangulares y en este caso el volumen de irradiación tiene una forma totalmente irregular, se ha de fabricar una colimación secundaria con la que ajustar el haz de radiación al volumen tumoral. Para ello (fig. 9) se vacía en un bloque de poliestireno expandido, una plantilla a escala, del esquema dibujado en la radiografía. El corte se hace con un sistema especial que traslada los puntos de la radiografía al poliestireno, manteniendo la divergencia del haz de radiación.

Este molde de poliestireno expandido se sitúa en una caja de madera o plástico de dimensiones adecuadas a la unidad de irradiación y se rellena de granalla de plomo (fig. 10). El espesor de plomo utilizado, que corresponde al del poliestireno, es función de la energía de la radiación (el de la figura tiene 8 cm de espesor para Co-60).

La caja se sitúa entre el equipo de irradiación y el paciente a una distancia fija del foco del haz, la cual se ha mantenido al fabricar el molde. La radiación queda parcialmente absorbida por el plomo que rodea al poliestireno y se obtienen distribuciones de dosis con un máximo en la zona central (mediastino) y un mínimo en los pulmones (fig. 11).

FIGURA 12. — Esquema: Sección transversal de un paciente a nivel de los ojos.

Irradiación de un tumor retroorbital (zona a trazos en la figura). Se ha optado por una técnica isocéntrica con dos haces de Co-60 modificados por filtros en cuñas de 45°. Los órganos críticos, en este caso, son los cristalinos de ambos ojos, ya que una dosis de 6 Gy sería suficiente para producir cataratas. El haz de irradiación, representado por una flecha, incide en la cabeza del paciente alternativamente por la cara lateral y anterior con direcciones que confluyen en el tumor. Un filtro en forma de cuña, de un material adecuado, contribuye a mejorar la distribución de la dosis.

Curiterapia. Otro grupo de técnicas de irradiación tienen en común la introducción de pequeñas fuentes radiactivas directamente en los tejidos que se quieren irradiar, o en cavidades naturales cercanas al tumor. Estas técnicas dan lugar a una especialidad dentro de la Radioterapia cuyo nombre es Curiterapia o Braquiterapia. Como fuentes radiactivas se utiliza sobre todo el ¹³⁷Cs, ¹⁹²Ir, ¹³¹I, ¹²⁵I, ⁹⁰Sr y algunos otros, en forma de granos o hilos muy finos. En la actualidad prácticamente se ha desechado el uso de ²²⁶Ra, debido a los problemas de Radioprotección que ocasionaba al personal que manipulaba las fuentes.

Estos tratamientos presentan ventajas respecto a la irradiación externa, como son:

- distribución ideal de la energía en el volumen
- mejor protección de los tejidos sanos circundantes

Pero también una serie de inconvenientes:

- sólo se pueden irradiar tumores fácilmente accesibles

- difícil colocación de las fuentes
- dosimetría complicada
- problemas de radioprotección del personal

lo cual ha influido en que su utilización no sea tan amplia como la de la radioterapia externa.

En la figura 13 se presenta un tratamiento típico ginecológico con una implantación de fuentes de Cs-137 y que tiene como distribución de dosis la de la figura 14.

En la figura 15, radiografía lateral de un tratamiento con horquillas de Ir-192 en un tumor de lengua.

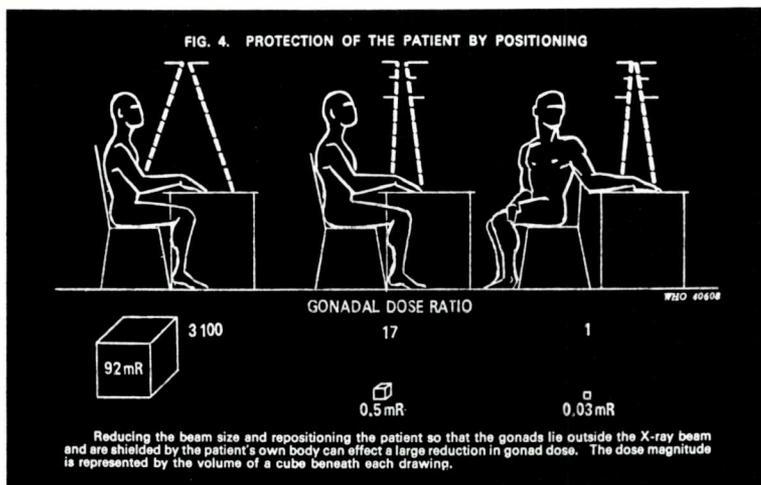


Figura 16

Todo lo dicho hasta aquí queda resumido en el siguiente organigrama, publicado por la Sociedad Americana de Física Médica, en el que con el título de Física en Radioterapia, se resumen las principales misiones del Departamento de Física de un hospital en relación con la Radioterapia, y que tiene como fin primordial asegurar la calidad técnica de los tratamientos, además de la Radioprotección del personal encargado de los mismos.

Radiodiagnóstico y Medicina Nuclear

El otro gran grupo de exploraciones médicas que tienen como herramienta principal las radiaciones ionizantes es el del diagnóstico por la imagen que inclu-

yen los exámenes con rayos X: radioscopia, radiografía, tomografía, etc., y las exploraciones con isótopos radiactivos: Medicina Nuclear.

En ambos casos la dosis de radiación recibida por el paciente es baja, sobre todo si se compara con la de terapia, del orden de las milésimas de rad, 10^{-6} Gy en las actuales unidades. (TABLA II)

TABLA II

DOSIS RECIBIDAS POR LAS GONADAS EN ALGUNAS EXPLORACIONES RADIOLOGICAS.
(mrad por examen).

<u>EXPLORACION.</u>	<u>MUJERES.</u>	<u>HOMBRES.</u>
Urografía descendente	590	430
" retrograda	520	580
Colon, enema de bario	870	300
Pelvis	230	300
Columna lumbar	410	210
Pelvimetría	620	-
Histerosalpingografía	1270	-
Femur (superior)	240	920
Colecistografía	120	8
Columna dorsal	<10	<10
Cabeza	<10	<10
Extremidades	<10	<10
Mamografía	<10	-

El riesgo, en este caso, no es el de producir lesiones inmediatas en los órganos irradiados, sino la probable inducción de rupturas cromosómicas en células somáticas y germinales, que den lugar a mutaciones con la consecuente influencia sobre la salud del individuo y sobre las generaciones futuras.

Para esta clase de efecto radiobiológico, no existe una dosis mínima, no existe dosis umbral, y además, aunque la dosis correspondiente a un examen radiológico sea pequeña, el número cada vez mayor de personas que se someten a estas pruebas (cada año aumenta en un 10 %), hace necesario reducirla, con el fin de reducir el riesgo a que está expuesta la población.

Los métodos de reducción de dosis se centran fundamentalmente en:

— Factores técnicos relativos al haz de rayos X y al detector (película, pantalla, etc.). Aquí serían válidos los criterios comentados respecto a la calibración de los haces de rayos X utilizados en terapia.

— Factores geométricos: reducción al mínimo de las dimensiones del haz, protegiendo las regiones anatómicas que no tienen interés para el diagnóstico, etc. Un ejemplo ilustrativo de este punto, es el presentado en la figura 16.

— Factores cuantitativos: limitar el número de exploraciones, sobre todo en los niños y en las mujeres en edad fértil, puesta en marcha de la llamada cartilla radiológica.

En las exploraciones diagnósticas con elementos radiactivos, la sustancia se administra al paciente, formando parte de un compuesto cuyas propiedades químicas no difieren de uno no radiactivo, el cual es metabolizado por un órgano: tiroides, hígado, etc., o sistema óseo, nervioso, que se pretende estudiar. La radiación emitida por el órgano es captada por un detector de centelleo que excita uno o varios fotomultiplicadores, generándose un conjunto de pulsos eléctricos con los que se puede formar una imagen en una pantalla o en papel. En algunos casos interesa estudiar el funcionamiento del órgano, en el tiempo, a partir de curvas de incorporación y eliminación de la sustancia radiactiva, obtenidas de un conjunto de imágenes secuenciales.

Se produce una acumulación de compuesto radiactivo en un órgano, dependiendo del elemento de que se trate. La cantidad de radiación recibida, la dosis, dependerá de la distribución del elemento radiactivo, de la energía que emite, del período de semidesintegración y del tiempo de eliminación de la sustancia.

En la TABLA III tenemos algunos ejemplos de cómo la utilización de un elemento como el ^{99m}Tc , de período de semidesintegración muy corto (6 horas) y energía también baja, hace que la dosis recibida por el órgano crítico, se reduzca notablemente. Se ha de jugar con los parámetros físicos de los elementos radiactivos, con el fin de que, obteniendo imágenes con la calidad necesaria para un buen diagnóstico, la dosis recibida por el paciente sea lo suficientemente pequeña para que el riesgo no sea superior al beneficio.

Conclusión

Todas las técnicas descritas aquí tienen una base física. Se trata de impedir que la radiación llegue al tejido sano, o por lo menos que, si lo hace, sea una cantidad tal, que no produzca lesiones irreversibles. Actualmente se están desarrollando otras técnicas que tienen una base química, son los llamados radioprotectores químicos, sustancias que reaccionan químicamente con los productos resultantes de la rotura de las moléculas por efecto de la radiación, controlando, así, el daño producido en las células.

TABLA III
DOSIS RECIBIDAS POR LOS PACIENTES EN PRUEBAS DIAGNOSTICAS REALIZADAS CON RADIO-NUCLEIDOS

PRUEBA	NUCLEIDO	ACTIVIDAD (μ Ci)	ORGANO CRITICO	ORGANO CRITICO	DOSIS (mrad)	GONADAS
GAMMAGRAFIA TIROIDEA	131-I	41	tiroides	73000	96	
"	99m-Tc	1700	"	430	14	
GAMMAGRAFIA RENAL	203-Hg	167	corteza renal	30000	80	
"	99m-Tc	3000	riñones	3000	150	
GAMMAGRAFIA HEPATICA	198-Au	182	bazo	7800	90	
"	99m-Tc	2800	higado-bazo	800	64	
GAMMAGRAFIA CEREBRAL	131-I	353	tiroides	12000	1600	
"	99m-Tc	10000	intestino grueso	1700	170	
FLUJO CEREBRAL	133-Xe	500	cerebro	8	1	
"	131-I	150	vejiga	270	8	
DETERMINACION VOLUMEN SANGUINEO	131-I	11	tiroides	380	50	
	125-I	3	sangre	8	2	

" Manual on Radiation Protection in Hospitals and general Practise" - O.M.S.

Por otro lado el conocimiento cada vez más exacto de la respuesta de la célula a la radiación y de los factores que modifican dicha respuesta, hace posible en algunos casos, controlar por medios físicos y químicos (calor, nivel de oxígeno, fraccionamiento, etc.) el efecto biológico de las radiaciones.

Todos estos métodos de Radioprotección están dirigidos hacia la irradiación con dosis altas, ya que las lesiones producidas son mucho más graves, no dando mucha importancia, generalmente, a las recibidas por los pacientes en las exploraciones diagnósticas, ya que los posibles efectos no se manifiestan a corto plazo.

Se puede decir que en nuestro país queda todavía mucho por hacer en este campo de la Radioprotección y que es una labor en la que han de participar, no sólo el personal sanitario responsable del tratamiento o prueba, sino también el propio paciente, exigiendo en algunos casos unas medidas mínimas de radioprotección o colaborando en su ejecución y la Administración Sanitaria controlando la utilización de las unidades generadoras de radiación.

Mi agradecimiento por la colaboración prestada, a la Dra. Concepción Cinos, adjunto de la Sección de Física y al Servicio de Radioterapia del Hospital «Príncipes de España».