Capítulo 9

Aplicaciones de las Radiaciones Ionizantes

9.1. Fuentes de radiación natural

Los seres humanos siempre han coexistido con la presencia de radiaciones ionizantes en su entorno y en su mismo cuerpo. La radiactividad natural se ha producido, se produce y se producirá en la naturaleza sin la intervención del hombre.

Las fuentes de radiactividad natural pueden tener origen terrestre, los radionucleidos primordiales, y/o origen extraterrestre, la radiación cósmica y los nucleidos cosmogénicos.

9.1.1. Radionucleidos primordiales

Se entiende por radionucleidos primordiales aquellas fuentes de radiación que existen en la corteza terrestre desde sus orígenes, así como sus descendientes radiactivos, en el caso de existir.

La radiactividad terrestre está formada por los radionucleidos primordiales, cuyos períodos de semidesintegración son lo suficientemente grandes como para sobrevivir al intervalo de tiempo transcurrido desde su creación, y los radioelementos secundarios originados al desintegrarse los primeros.

Al formarse la Tierra, hace aproximadamente 5000 millones de años, había en ella una cantidad de isótopos radiactivos mucho mayor de la que se observa en la actualidad, habiéndose desintegrado, y por consiguiente desaparecido, la mayoría de ellos. Los radioelementos con períodos menores de 10^8 años son indetectables una vez transcurridos unos 30 períodos desde su creación, mientras que aquellos que poseen períodos de semidesintegración mayores de 10^{10}

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

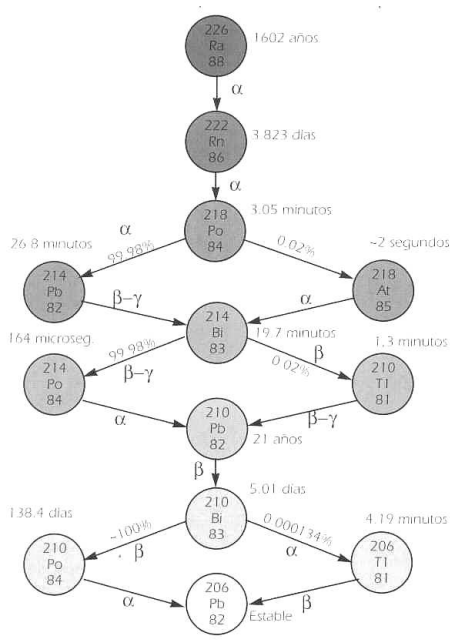

Figura 9.1: Esquema parcial de la serie del U^{238}, a partir del Ra^{226}.

Se conoce la existencia de, al menos, veintidós radionucleidos naturales primordiales que no forman parte de las sedes radiactivas naturales: K^{40}, V^{50}, Rb^{87}, Cd^{113}, In^{115}, Te^{123}, La^{138}, Ce^{142}, Nd^{144}, Sm^{147}, Sm^{148}, etc. De éstos sólo son importantes, desde un punto de vista dosimétrico y ambiental, el K^{40} y el Rb^{87} (este emisor beta puro). El resto de radionucleidos poseen períodos de semidesintegración demasiado grandes y las concentraciones ambientales son tan pequeñas que carecen prácticamente de importancia, al menos en lo que a impacto radiológico ambiental se refiere.

Posiblemente el K^{40} es el radionucleido de origen terrestre que aisladamente posea mayor importancia a efectos de dosis. Este elemento posee un período de $1{,}3\times10^9$ años y su abundancia isotópica es de 0,0118 % en el potasio natural, que forma parte de todos los organismos vivos y que es imprescindible para el desarrollo de la vida.

El K^{40} es fácilmente identificable mediante espectrometría gamma, pues emite, además de partículas beta con una energía máxima de 1,31 MeV, fotones de 1,46 MeV de energía.

9.1.2. Radiación cósmica y nucleidos comogénicos

Los rayos cósmicos están formados por partículas de origen extraterrestre de gran energía, y por las partículas formadas por ellos al interaccionar con los elementos que forman parte de

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

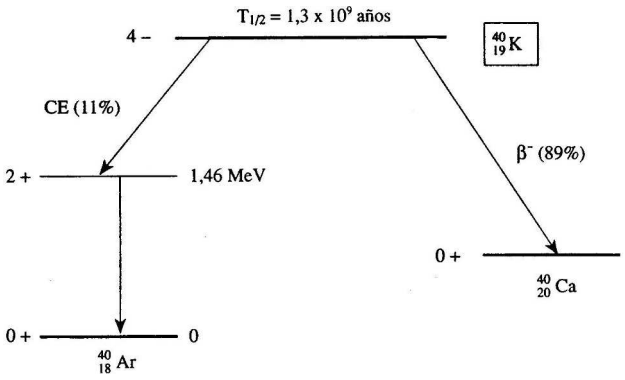

Figura 9.2: Esquema de desintegración del K^{40}.

se hallan formando parte de los sedimentos marinos o de la litoesfera. En general se trata de emisores beta de poco energía y periodo corto (excepto el C^{14} con 5760 años de periodo). El C^{14} se forma en las capas altas de la atmósfera, al interaccionar los neutrones de los rayos cósmicos con el N^{14} según la reacción

$$n + N^{14} \longrightarrow C^{14} + p \tag{9.1}$$

Otros nucleidos cosmogénicos son el Be^7 y el Na^{22}. El Be^7 emite betas y fotones gamma de 0,43 MeV. El Na^{22} emite positrones y gamma, los positrones emitidos producen radiación de aniquilación.

9.1.3. Radiactividad natural nociva. El radón

El Radón es el único gas que aparece en las cadenas radiactivas naturales (por ejemplo del ^{232}Th, ^{235}U y ^{238}U), compone el fondo radiactivo natural. Se calcula que unos 9000 cánceres de pulmón/año en EEUU son debidos a la desintegración del Rn y sus hijos, acumulado en el interior de las casas. Se acumula sobre todo en sótanos y edificios poco ventilados. Sólo el ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,824$ d) es importante; es el que proviene de la desintegración del ^{226}Ra ($T_{1/2} = 1602$ años) que decae (ver figura 9.1)

$$^{226}Ra \rightarrow {}^{222}Rn + \alpha$$

Las desintegraciones son,

Desintegración	$T_{1/2}$	T_α (MeV)	cadena
$^{222}Rn \rightarrow {}^{218}Po + \alpha$	3,82 d	5,49	^{238}U
$^{220}Rn \rightarrow {}^{216}Po + \alpha$	55,6 s	6,28	^{232}Th

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Bq/m^3, cantidad que puede llegar a ser un orden de magnitud superior en los sótanos poco ventilados de las viviendas. (1 Bq/m^3 = 0,027 pCi/ℓ). Se estima que la dosis inhalada a cielo abierto, debida al Rn es del orden de 10 a 20 mrem por año.

9.2. Fuentes de radiación artificial

9.2.1. Aplicaciones médicas

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.

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.

Radiología

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 encuentra, 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, 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 e interacción Compton. 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 interaccionado 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 interaccionen

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

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.

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 del kV adecuado 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 el 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.).

Radiología con equipos de diagnóstico

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 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 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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

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. En la actualidad, este tipo de equipo está prohibido en la legislación española, al igual que en el resto de la Unión Europea.

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, la cual es almacenada temporalmente en la memoria y finalmente presentada como una matriz de intensidades.

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 mediante 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.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

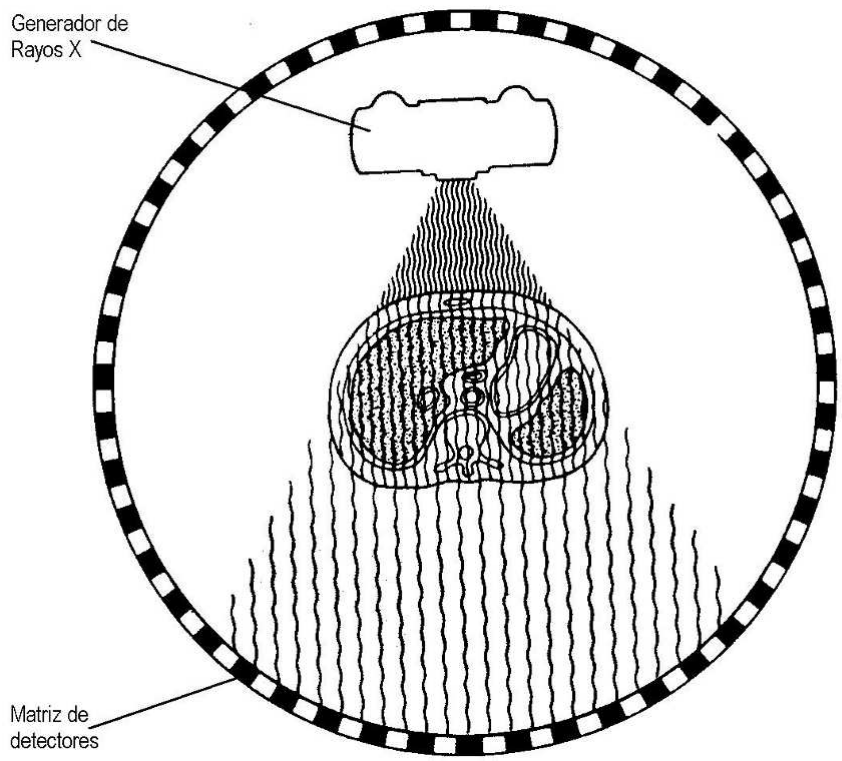

Figura 9.3: Dibujo esquemático de un equipo de tomografía computerizada. La única parte móvil es el generador, la matriz de detectores permanece fija.

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 o más, administradas 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).

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 braqui que quiere decir corto, donde los tratamientos se llevan a cabo con fuentes radiactivas —encapsuladas o sólidas protegidas por una envoltura metálica— en contacto o dentro del tejido u órgano a tratar.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

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 casos 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 RT 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 T.V..

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 γ (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.

Medicina nuclear

Los objetivos de la Medicina Nuclear son la realización de pruebas de diagnóstico y de tratamiento, mediante el uso de radionucleidos 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 I^{131} para diagnóstico y terapia del tiroides así como el I^{125} para estudios in vitro.

En los años 60 aparecen las gammacámaras (Cámara de Anger) y el Tc^{99m} que son la base

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

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 periodo efectivo (T_{ef})

$$\frac{1}{T_{ef}} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_{bio}} \tag{9.2}$$

donde $T_{1/2}$ es el periodo de semidesintegración y T_{bio} es el periodo de eliminación biológica.

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 keV es muy significativa la autoabsorción de los fotones por el propio paciente y por encima baja mucho la eficiencia del tipo de detector habitualmente empleado. En cuanto al periodo 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 pertecnectato 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.

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.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

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, 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 consecutivas. 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 radionúclido 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

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

9.2.2. Aplicaciones industriales

Producción de energía nucleoeléctrica en centrales nucleares

La utilización más evidente de las radiaciones ionizantes en la industria es la producción de energía eléctrica en centrales nucleares. Tanto en un reactor nuclear, como en una central térmica, se transforma la energía calorífica de un combustible en energía mecánica, y ésta en eléctrica. El calor producido calienta un fluido (normalmente agua), que se convierte en vapor. Este vapor principal, u otro vapor secundario producido por el primero, pasa por una turbina que acciona un alternador produciendo energía eléctrica. El vapor se hace pasar por un condensador para convertirlo de nuevo en agua, y mediante bombas se vuelve a enviar al foco caliente, es decir al reactor nuclear o a un generador de vapor, volviéndose a convertir de nuevo en vapor y repitiendo el ciclo.

El combustible utilizado en la mayoría de las centrales nucleares es el Uranio. El Uranio natural tiene dos isótopos principales, el U^{238} (99,3 %) y el U^{235} (0,7 %). En España se enriquece el Uranio aumentando artificialmente la concentración de U^{235} hasta $\sim$ 4 %, fabricándose el elemento combustible con Uranio enriquecido, que se utiliza en el funcionamiento de las centrales nucleares españolas (fisión nuclear). Normalmente el grado de enriquecimiento del elemento combustible que se emplea en los reactores nucleares es del orden del 3 al 5 %, lo que diferencia estos materiales de los empleados en aplicaciones no pacíficas, donde los factores de enriquecimiento en el isótopo fisionable son mucho más elevados. La utilización del Uranio para la producción de energía eléctrica requiere toda una serie de actividades industriales que se engloban bajo el título genérico de "ciclo de combustible": minería del uranio, concentración, conversión y enriquecimiento, fabricación del elemento combustible, uso del combustible en un reactor, reelaboración y almacenamiento de residuos.

En un reactor nuclear, los núcleos de ^{235}U cuando capturan un neutrón, se fisionan en trozos más pequeños, liberándose neutrones y una gran cantidad de energía. Estos neutrones liberados en la reacción de fisión son capaces de provocar nuevas fisiones, dando lugar a lo que se llama una reacción en cadena.

En una central nuclear el calor proviene de la reacción en cadena que tiene lugar en el reactor nuclear. La regulación del calor que se produce dentro del reactor se lleva a cabo con determinados elementos de control que modifican el flujo neutrónico. El sistema más utilizado para modificar el número de neutrones es el de Barras de Control. Se trata de unas barras constituidas por materiales absorbentes de neutrones (fundamentalmente de boro y cadmio) que se introducen en el núcleo del reactor. Al insertar estas barras disminuye la cantidad de neutrones y por tanto la velocidad de reacción, y al extraerlas, aumenta. Con este sistema se modifica la potencia del reactor.

Tras la fisión nuclear, los neutrones tienen una energía muy alta, que no es eficaz para producir nuevas fisiones. Es necesario reducir su energía, su velocidad. Para ello se emplea un moderador

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Asco, Vandellós II, Almaraz, Trillo, Garoña, y Cofrentes. Las 4 primeras son centrales nucleares tipo PWR (agua a presión), y las dos últimas son tipo BWR (centrales nucleares de agua en ebullición). La potencia total producida en el año 2003 fue de 7896 MW. Se trata de centrales nucleares de gran potencia que operan en régimen continuo que producen energía eléctrica limpia, a efecto de vertido de gases, ayudando a cumplir los acuerdos de Kyoto.

La industria nuclear no sólo contempla la explotación de centrales nucleares, sino que abarca una serie de actividades relacionadas con la producción de energía eléctrica de origen nuclear:

- Fabricación del combustible nuclear en la Planta de Juzbado (Salamanca), propiedad de ENUSA (Empresa Nacional del Uranio)
- Gestión de residuos radiactivos: ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radiactivos)
- Ingenierías con experiencia en Seguridad Nuclear y Protección Radiológica.
- Empresas cualificadas para la formación integral de técnicos nucleares.
- Empresas de servicios: áreas relacionadas con la explotación de las centrales nucleares (mantenimiento, Protección Radiológica, inspección,...).
- Laboratorios especializados en centros de investigación

Las fuentes radiactivas ya utilizadas o los materiales que una vez empleados han resultados contaminados y se han considerado deshechos, habrá que almacenarlos o eliminarlos de forma controlada, pues siguen siendo radiactivos. Se considera residuo radiactivo a cualquier material que contiene o está contaminado por radionucleidos en concentraciones superiores a las establecidas por la autoridad reguladora, para el cual no está previsto ningún uso posterior.

Los residuos que se obtienen en la generación de energía eléctrica de origen nuclear, en la medicina, en la industria y en la investigación, y en la clausura de instalaciones nucleares, se clasifican desde el punto de vista de su almacenamiento definitivo, en residuos de media-baja actividad y residuos de alta actividad. Los residuos de media-baja actividad se almacenan en El Cabril (Córdoba), bajo tierra, en instalaciones debidamente acondicionadas. El almacenamiento definitivo de los residuos de alta actividad se está investigando en la actualidad, analizando las distintas opciones desde los puntos de vista científico y tecnológico. Todo indica que la mejor ubicación, que puede garantizar confinamiento durante el tiempo necesario para su inocuidad, es su almacenamiento profundo en formaciones geológicas estables, que posean capacidad para retener los radionucleidos que pudieran escapar de las barreras artificiales a las que están sometidos, de forma que no exista riesgo para el hombre ni para el medio ambiente.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Radiografía y gammagrafía Industrial

La industria se aprovecha de la capacidad de las radiaciones para atravesar objetos. Los rayos X por ejemplo se utilizan para vigilar el contenido de las maletas en los controles de seguridad de los aeropuertos y para examinar el correo para la detección de explosivos.

En la industria de soldadura los rayos X se emplean para verificar uniones de soldadura. Las radiografías muestran posibles defectos en la unión, inclusiones de escoria o grietas. Para radiografiar gruesos espesores de materiales y reducir el tiempo de exposición se utilizan fuentes emisoras de radiaciones gamma, más penetrantes que los rayos X, como Co^{60} ó I^{192}.

Se detectan fugas en el alcantarillado introduciendo por las tuberías una solución con alguna sustancia radiactiva de periodo corto. La mezcla de agua y trazador radiactivo sale a través de la fuga y se esparce por el suelo. La posición de la fuga se lleva a cabo utilizando un detector de radiaciones que localiza el agua radiactiva que ha salido por la fuga y ha inundado el suelo. Para cuando los trabajadores municipales llegan a reparar la tubería la actividad ha decaído, desapareciendo cualquier rastro de radiactividad de forma natural.

Control del espesor en láminas metálicas, de papel o de plástico

En la producción de algunos productos derivados del papel, películas de plástico y láminas metálicas, se utilizan las radiaciones para controlar el espesor. Se coloca una fuente de radiación a un lado de la lámina, y un detector de radiaciones al otro. Si varía el grosor de la lámina el detector percibe un cambio en la intensidad de las radiaciones. Una señal emitida por el detector puede incluso controlar los rodillos de presión que mantienen el grosor de la lámina dentro de límites especificados previamente. La radiación gamma es la más utilizada en la fabricación de láminas metálicas, siendo la radiación beta de mayor aplicación en la industria del papel y del plástico.

Aceleradores para esterilización de material quirúrgico e irradiación de alimentos

Las radiaciones muy intensas se utilizan para esterilizar instrumentos quirúrgicos. Si la exposición es suficientemente potente y duradera, todos los gérmenes, bacterias y microbios serán destruidos. La misma técnica es perfectamente aplicable a los productos alimenticios para mejorar su conservación, aunque este procedimiento no es comúnmente aceptado por los consumidores, por lo que esta técnica no está muy extendida. La irradiación de alimentos se ha confirmado que es efectiva para inhibir el deterioro y las enfermedades transmitidas por alimentos, en vez de tratarlos químicamente. Es necesario entender que un paciente no se vuelve radiactivo después de un examen de rayos X, y los instrumentos quirúrgicos tampoco después de su esterilización por irradiación; de igual forma, los productos alimenticios tratados por radiación gamma tampoco se vuelven radiactivos ni se desnaturalizan.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

El C^{14} es un isótopo radiactivo natural que se está produciendo continuamente y que va desapareciendo por desintegración radiactiva. El ^{14}C se forma en la atmósfera y es rápidamente dispersado en la atmósfera como CO_2.

A lo largo de miles de millones de años la relación entre el Carbono no activo (C^{12}) y el C^{14} ha alcanzado en la atmósfera un estado de equilibrio. Así, en la época pre-industrial la relación isotópica atmosférica de C^{14}/C^{12} era $1{,}2\times10^{-12}$; en un modelo simplificado los organismos vivos participantes del ciclo de carbono vía procesos metabólicos están caracterizados por esta concentración de radiocarbono. Cuando un organismo vivo muere, el intercambio de Carbono se para, los tejidos ya no adquieren más carbono nuevo, pero tampoco se libera el carbono viejo, y sin embargo la cantidad de carbono radiactivo sigue disminuyendo debido a la transformación radiactiva. Se sabe que el periodo de semidesintegración del C^{14} es de 5730 años, midiendo la concentración de C^{14} residual en muestras orgánicas es posible calcular el tiempo transcurrido desde que el material fue formado originariamente. Por ejemplo, si el análisis indica que el contenido de C^{14} es la mitad de lo esperado, se concluye que la vida de la muestra llegó a su fin hace 5730 años (ha transcurrido un periodo radiactivo).

Existen otros métodos de datación además de la técnica del C^{14}. Se utiliza también la activación neutrónica que consiste en la irradiación de una muestra (en este caso sería una pintura, una vasija, ...) con neutrones y, como consecuencia de dicha irradiación, producción de diversos isótopos radiactivos por activación. Con la medida de la radiación emitida por dichos isótopos, o con el análisis de los mismos, pueden identificarse y cuantificarse elementos microconstituyentes en elementos valiosos. Los resultados pueden servir para identificar su época de origen, por lo cual se trata de un método de gran utilidad en arqueología, tanto para el estudio de antiguas civilizaciones, como para el fechado y determinación del origen de objetos diversos. La identificación del contenido de trazas de pintura antiguas, junto con el contenido de impurezas de los pigmentos utilizados puede ser un indicador de la edad de la pintura, e incluso de la región donde fue pintada.

La aplicación de la técnica de activación neutrónica para el análisis y datación en arqueología, se debe a Robert Oppenheimer, a raíz de una conferencia expuesta en Princeton en 1956. Se trata de un método no destructivo, muy sensible y preciso. Se puede realizar el análisis con muestras muy pequeñas (5 mg o menos), y el objeto conserva su integridad, no se destruye, no se deteriora, ya que el n^o de átomos estables que se transforman en radiactivos es ínfimo, y la radiactividad inducida decae muy rápidamente, quedando totalmente inalterado el objeto.

Estos son algunos ejemplos de los usos industriales de las Radiaciones Ionizantes, pero hay algunos más.

9.3. Introducción a la protección radiológica

Como ya hemos comentado al comienzo de este tema, el hombre ha estado siempre expuesto a fuentes naturales de radiaciones ionizantes: rayos cósmicos, materiales radiactivos que se

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

radiactivas naturales o radioisótopos producidos artificialmente, en actividades de la medicina, la industria, la agricultura o la investigación ha reportado muchos beneficios a la humanidad, pero también la hacen estar sometida a ciertos riesgos que no quedan limitados a un pequeño grupo de personas, sino a numerosos trabajadores y a la población en su conjunto.

A finales del siglo XIX, se vieron los efectos biológicos nocivos de las radiaciones en los primeros usuarios de los rayos X y materiales radiactivos concentrados. Esto creó la necesidad de protegerse contra los efectos perjudiciales y a partir de 1928 se inicia la elaboración de normas de **Protección Radiológica**, un organismo internacional denominado "Comisión Internacional de Protección contra los rayos X y el Radium" que agrupaba a una serie de profesionales en el tema. Después de una interrupción de esta comisión durante la segunda guerra mundial, pasó a partir de 1950 a denominarse "Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)".

La finalidad de la Protección Radiológica es **"La protección de los individuos, sus descendientes y la humanidad en su conjunto contra los riesgos que se derivan de las actividades humanas que por las características de los materiales y equipos que utilizan pueden implicar irradiaciones".**

La ICRP ha sido y continúa siendo el Organismo encargado de establecer la filosofía de la protección radiológica, proporcionando las recomendaciones generales y fundamentales para la utilización segura de las radiaciones ionizantes, en las múltiples aplicaciones que han hecho posible el amplio y rápido desarrollo de la energía nuclear y de las aplicaciones de los radionucleidos y de los equipos emisores de este tipo de radiaciones. En España el organismo regulador es el **C.S.N.** (Consejo de Seguridad Nuclear), que depende directamente del Gobierno de la Nación.

9.3.1. Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. Clasificación

Las radiaciones no afectan únicamente a los tejidos sino que la exposición del tejido germinal se traduce en efecto para los descendientes.

La magnitud de los efectos provocados por el ataque a tejidos y órganos, depende de las características del tejido y de su capacidad para compensar y reparar los daños causados.

Hay distintas posibilidades para clasificar los efectos de las radiaciones. Aquí vamos a referirnos a la que más frecuentemente se utiliza en Protección Radiológica, que hace referencia a la transmisión celular de los efectos y su relación con la dosis: **Estocásticos y Deterministas**.

EFECTO DETERMINISTA

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

	EFECTO ESTOCÁSTICO La gravedad no depende de la dosis. Se relaciona con mutaciones.
EFECTOS GENÉTICOS Hereditarios	Ej: Anomalías hereditarias
EFECTOS SOMÁTICOS No hereditarios	Ej: Carcinogénesis

Efectos estocásticos Incluso a dosis muy bajas es posible que se deposite energía suficiente en una célula como para provocar una transformación o la muerte celular. La muerte de una o varias células, en la mayoría de los casos, no tendrá repercusiones sobre un tejido. Sin embargo las modificaciones en las células aisladas tales como modificaciones genéticas o transformaciones que conducen ulteriormente a la malignidad, tendrán serias consecuencias. Existe una probabilidad de que se produzca este tipo de efectos estocásticos, incluso a dosis extremadamente bajas. No hay evidencia científica de que exista o pueda existir un umbral por debajo del cual no se produzcan efectos negativos en la salud. Si la dosis aumenta, la frecuencia de estos efectos también aumenta, sin embargo no es de esperar que aumente la severidad de los efectos, al contrario de lo que sucede con los efectos deterministas.

Efectos deterministas A dosis más elevadas, puede producirse un grado importante de muerte celular, suficiente para que se detecten cambios en el tejido. Para cualquier daño no estocástico definido debe haber perecido un determinado número de células para que el nivel de detección sea alcanzado. Ello constituye un umbral, cuya magnitud dependerá del daño elegido, por debajo del cual la pérdida celular y los daños producidos en la función del tejido u órgano no son detectables. En este tipo de efectos la severidad es función de la dosis recibida.

9.3.2. Sistema de Limitación de Dosis

El Sistema de Limitación de Dosis está basado en tres criterios u objetivos parciales fundamentales:

- Justificación.
- Optimización.
- Limitación de dosis individual.

Justificación

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

El proceso de justificación puede representarse esquemáticamente por la expresión

$$B = V - (P + X + Y) \tag{9.3}$$

donde:

B es el beneficio neto resultante de la actividad.

V es el valor bruto de la actividad, que incluye el valor del producto resultante, el de los beneficios sociales tangibles y no tangibles y los beneficios de cualquier otra índole.

P representa los costes de producción, incluidos los costes para la sociedad de los detrimentos no radiológicos y los costes de protección contra los riesgos radiológicos.

X es el coste de la protección radiológica.

Y es el coste para la sociedad del detrimento radiológico, que es proporcional a la dosis efectiva colectiva, S_E.

Optimización

El objetivo principal de la optimización es consecuente con la idea de que cualquier dosis implica un riesgo, por lo tanto hay que mantener todas las exposiciones "tan bajas como sea razonablemente posible "**ALARA** (**A**s **L**ow **A**s **R**easonably **A**chievable) teniendo en cuenta las condiciones socio-económicas aplicables.

El valor "ALARA" corresponde al nivel de dosis efectiva colectiva por debajo del cual el coste de cualquier medida adicional de protección radiológica sería mayor que el valor de la reducción del detrimento para la salud que con ella se conseguiría. Este criterio se ha venido denominando como optimización de la protección radiológica.

La determinación del nivel más bajo de exposición que puede alcanzarse razonablemente puede realizarse por distintas técnicas. Una de ellas es el análisis diferencial de coste-beneficio con el fin de obtener la combinación óptima de protección adecuada y coste bajo del detrimento. Esta técnica es aplicable sólo cuando los integrantes de la función pueden ser cuantificados en términos de coste monetario.

La protección radiológica podrá ser optimizada cuando la suma del coste de la protección, X, y del detrimento radiológico para la salud, Y, sea mínima.

La optimización de la protección radiológica debe efectuarse tanto en el diseño como en la ejecución de toda operación justificable que pueda contribuir de manera significativa a la irradiación de los profesionales y el público.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

La relación que mejor se ajusta a los datos epidemiológicos disponibles de los efectos estocásticos es la lineal-cuadrática. Para dosis de radiación bajas resulta muy improbable que el núcleo de una célula sea atravesado por más de una traza, por lo que la curva dosis-respuesta para efectos en una célula debería ser lineal e independiente de la tasa de dosis. Luego, bajo las suposiciones mencionadas, la relación matemática entre la dosis recibida y la probabilidad de aparición de un efecto atribuible a la radiación, por ejemplo, la generación de cánceres, está casi obligada a ser lineal y a no tener un umbral de dosis. Así, para estimar la probabilidad de los efectos de la exposición a dosis bajas de radiación con propósitos de protección radiológica, se usa la expresión

$$P = \beta D$$

donde D es la dosis y β la pendiente de la curva, es decir la probabilidad del efecto considerado por unidad de dosis.

La limitación de dosis que las personas profesionalmente expuestas y las del público en general puedan recibir, es el requisito establecido para asegurar una protección adecuada, incluso para las que están más expuestas. Los límites recomendados representan los valores inferiores de la dosis efectiva y de la dosis equivalente, que no deben ser sobrepasados en las circunstancias en que las personas se vean implicadas durante la realización de las distintas prácticas con radiaciones.

Es importante tener en cuenta que los límites de dosis no deben ser considerados como la línea divisoria entre la seguridad y el peligro y que han de ser realmente considerados como la exposición a un riesgo aceptable.

Límites de dosis para las personas profesionalmente expuestas En las recomendaciones del ICPR, y con el fin de controlar la incidencia de efectos estocásticos, se establecieron límites correspondientes a la dosis equivalente efectiva. Para ello se estimó que podía considerarse aceptable, tanto en la industria nuclear, y en general para todo trabajo en presencia de radiaciones ionizantes, un riesgo equivalente al existente en aquellas industrias o trabajos que poseen el más elevado índice de seguridad. Para este tipo de industrias o trabajos, el promedio de mortalidad anual derivado del trabajo se encuentra en el orden de 10^{-4}, es decir que puede morir una persona entre 10000. Por tanto, tomando este valor de riesgo como referencia, la probabilidad media de muerte a causa de inducción de tumores malignos no debía sobrepasar ese índice de 10^{-4} y que para los máximamente expuestos no debería ser superior a 10^{-3}.

A partir de los factores de riesgo que entonces se habían determinado se llegó a la conclusión de que una dosis efectiva no superior a 5 mSv por año implicaría un riesgo del orden de 10^{-4} para la mortalidad por cáncer.

La dosis limitativa se puede expresar como una dosis recibida uniformemente a lo largo de toda la vida laboral, o como una dosis anual recibida cada año de trabajo.

El establecimiento de un límite para la exposición de 50 mSv por año, daba lugar, conside-

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Estos límites se consideraban válidos tanto para la irradiación de un sólo tejido u órgano como para la del conjunto de ellos, si su incidencia en la dosis efectiva no sobrepasa el límite para ésta y tenían por objeto limitar las irradiaciones que ya cumplían la limitación correspondiente a los efectos estocásticos.

Límites de dosis para el público Haciendo consideraciones análogas a las efectuadas para establecer los riesgos de las personas profesionalmente expuestas, la ICPR asumió que un nivel de riesgo de mortalidad del orden de 10^{-6} a 10^{-5} por año, podría ser aceptable para el caso del público. En consecuencia recomendó para cualquier individuo un límite anual de dosis de 5 mSv, siempre y cuando a lo largo de la vida, la dosis acumulada no fuese superior a 70 mSv. Este criterio fue posteriormente modificado, en 1985, para recomendar un límite de dosis, para exposiciones prolongadas, de 1 mSv por año, aceptando que algunos años pudieran recibirse 5 mSv siempre y cuando la dosis a los 70 años no fuese superior a 70 mSv.

Estos límites deben aplicarse a todas las exposiciones sujetas al sistema de protección, a que puedan verse sometidos los individuos como consecuencia de todas las actividades en que se vean implicados y supongan un riesgo de exposición a las radiaciones ionizantes. Se excluyen especialmente las exposiciones médicas (como paciente) y en el caso del público la exposición a la radiación natural.

LÍMITES ANUALES DE DOSIS (Real decreto 783/2001)			
Tejido u órgano	**Personal**	**Dosis**	**Límite**
Todos excepto cristalino	Profesionalmente expuesto	Equivalente	0,5 Sv (50 rem)
Cristalino	Profesionalmente expuesto	Equivalente	0,15 Sv (15 rem)
Totalidad organismo uniformemente o a determinados órganos o tejidos	Profesionalmente expuesto	Equivalente efectiva	50 mSv (5 rem)
Totalidad organismo uniformemente o a determinados órganos o tejidos	Individuos del público en general	Equivalente efectiva	1 mSv (0,1 rem)
Todos excepto cristalino	Individuos del público en general	Equivalente	50 mSv (5 rem)
Cristalino	Individuos del público en general	Equivalente	15 mSv (1,5 rem)

9.3.3. Factores de protección contra irradiación externa

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Tiempo

La dosis acumulada por el individuo al permanecer un tiempo t en las proximidades de una fuente es (recordando la definición de tasa de dosis)

$$D = \dot{D} \cdot t \tag{9.4}$$

por lo que, evidentemente, es conveniente estar el menor tiempo posible.

Distancia

La radiación γ o rayos X, considerando la fuente de emisión puntual, se propagan en el espacio siguiendo la conocida ley de proporción inversa al cuadrado de la distancia

$$D \sim \frac{1}{d^2} \tag{9.5}$$

Según esto, al alejarse de la fuente, la intensidad de radiación disminuye en la misma proporción y viene expresado por

$$\frac{D(d_1)}{D(d_2)} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \tag{9.6}$$

Se observa con esto que la dosis recibida en un mismo intervalo de tiempo a un metro de la fuente disminuirá a 1/4, al alejarse a 2 metros, como puede comprobarse viendo la ecuación (9.6).

En el caso de la radiación α o β, hay que tener en cuenta su alcance limitado en aire, que depende de su energía umbral.

Blindajes

Existen casos en los que no se puede reducir el tiempo de permanencia y la distancia de operación. Entonces se recurre a poner un **blindaje.**

El blindaje interpuesto entre la fuente y el individuo es un material absorbente de las radiaciones ionizantes de que se trate, con la finalidad de tener a la salida una disminución adecuada de la radiación.

Según el tipo de radiación y la energía de la fuente se pueden clasificar los blindajes en tres grupos:

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Blindajes para partículas cargadas Los blindajes para partículas α no ofrecen problemas especiales debido a su corto alcance. Basta con conocer el alcance de la partícula para esa energía en ese material y aumentar ligeramente el espesor de material.

Para partículas β aparece el problema de la existencia de la radiación de frenado, que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar el blindaje correspondiente, pero el alcance de los electrones es corto, del orden del metro en aire. Un blindaje adecuado en este caso sería una capa de absorbente de número atómico bajo (plástico o aluminio) para minimizar el efecto de la radiación de frenado (recordar que es proporcional Z), seguido de una capa fina de plomo para atenuar la radiación de frenado producida en el primer absorbente.

Blindajes para radiación gamma y rayos X En el estudio de los blindajes para radiación gamma y rayos X, es necesario tener en cuenta diversos factores: naturaleza y forma de la fuente emisora, la energía de emisión y el flujo que se quiere obtener al otro lado del blindaje.

Para hacer un cálculo sencillo, se puede considerar que la fuente es puntual emitiendo S fotones/s y se le interpone un absorbente de espesor r, con coeficiente de absorción μ. Resulta que a la salida del absorbente el flujo será

$$\phi = S\frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2} \tag{9.7}$$

donde el numerador representa la atenuación sufrida al atravesar el espesor r.

Este flujo de radiación se puede medir en magnitudes útiles en dosimetría, como la tasa de dosis, haciendo los cambios de unidades correspondientes.

Al deducir esta sencilla expresión, no se ha considerado el hecho de que los fotones en su recorrido en el material sufren no solo absorción sino que también pueden sufrir colisiones dispersivas (Compton, creación de pares) y como consecuencia se puede producir radiación en otras direcciones. Se dice que se produce un **efecto de acumulación**. Para contabilizar este efecto, se introduce otro término en la ecuación (9.7) llamado **"factor de acumulación"** B_p y que considera el incremento de radiación producido. El término $B_p(\mu, r)$ depende del recorrido del fotón en el material y del coeficiente de atenuación μ. Por lo que queda finalmente

$$\phi = S \cdot B_p(\mu, r)\frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2}$$

Los factores de acumulación están tabulados para diferentes materiales y energías.

Blindajes para neutrones Para atenuar la radiación neutrónica se utilizarán blindajes de distintos materiales. Para estimar su tamaño se tiene en cuenta las propiedades de interacción de los neutrones con la materia, que varían en función de la energía.

Los neutrones rápidos (muy energéticos) se moderan en colisiones elásticas con materiales

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

- Un espesor de material hidrogenoide (bajo Z) para moderarlos hasta térmicos.
- Un espesor de Cd o B, para absorberlos.
- Un espesor de alto Z (Pb) para detener la radiación γ, que acompaña a los neutrones.

9.4. Ejemplos de dosis

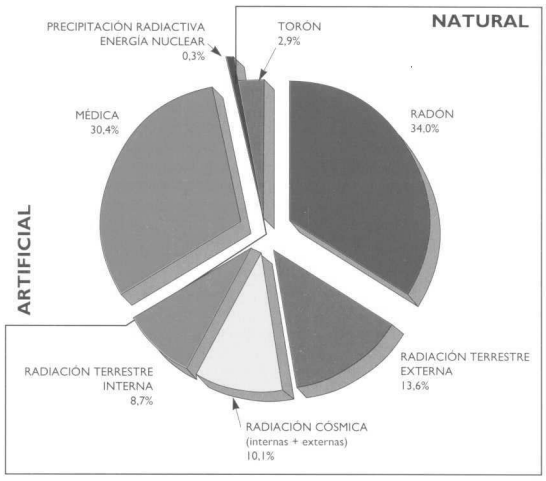

Figura 9.4: Contribución de las distintas fuentes de radiación (natural y artificial) a la dosis total.

La dosis letal (50 % de probabilidad de muerte en 30 días) es de 100 a 300 rems (1-3 Sv). En Hiroshima y Nagasaki se recibieron dosis superiores a 100 rem (1 Sv).

Habitualmente se distingue entre **dosis altas** ($\geq$ 1 Sv) que son muy destructivas (leucocitos de la sangre, células intestinales, médula) y si se reciben en poco tiempo (algunas horas) pueden causar la muerte, y **dosis bajas**. Para estas últimas es muy difícil fijar un umbral de peligro. Los efectos parece ser que son proporcionales a la dosis total integrada.

En la tabla 9.1 se resume la relación de dosis anuales medias que puede recibir una persona por emisiones naturales o por placas de rayos X.

Origen	mrem/año
placa X	50
cósmicos	35

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.

Se ha determinado que la dosis anual que reciben las tripulaciones de los aviones es de 5 mSv. La densidad de la atmósfera equivale a unos 4 metros de cemento; si se viaja a 10 km de altura la atmósfera remanente equivale ya a sólo un metro de cemento.

En la determinación de dosis debidas al Radón se han llegado a medir hasta 200 mrems (2 mSv), aunque el valor medio es 0,5 mSv, como aparece en la tabla anterior.

El $K^{40}(1,25\times10^9$ años), representa el $1,17\times10^{-4}$ del potasio natural. Es un electrolito crítico en la sangre. Puede estimarse que una persona de 70 kg, recibe una autodosis de 10^{-7} Ci sólo debido a los elementos radiactivos en su interior: K^{40} y C^{14}.

Autoevaluación

1. El alcance de los rayos X en plomo:
   - *a*) Es infinito.
   - *b*) Es del orden de cm.
   - *c*) Es del orden de mm.
   - *d*) Es del orden de m.
2. En medicina nuclear los tratamientos se hacen con:
   - *a*) Fuentes encapsuladas en el interior del tejido a tratar.
   - *b*) Fuentes no encapsuladas en el interior del tejido a tratar.
   - *c*) Fuentes encapsuladas a distancia del paciente.
   - *d*) Fuentes no encapsuladas a distancia del paciente.
3. ¿Qué fotones forman la imagen radiológica?
   - *a*) Los emitidos por el paciente.
   - *b*) Los absorbidos por el paciente.
   - *c*) Los transmitidos por el paciente.
   - *d*) Los emitidos por la placa fotográfica.

Soluciones:

1. Respuesta A
2. Respuesta B
3. Respuesta C

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

- - -

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

www.cartagena99.com no se hace responsable de la información contenida en el presente documento en virtud al Artículo 17.1 de la Ley de Servicios de la Sociedad de la Información y de Comercio Electrónico, de 11 de julio de 2002.
Si la información contenida en el documento es ilícita o lesiona bienes o derechos de un tercero háganoslo saber y será retirada.