

LAS RADIACIONES IONIZANTES: UNA REALIDAD COTIDIANA

THE IONISING RADIATIONS: A DAILY REALITY

Eduardo Gallego Díaz

Departamento de Ingeniería Nuclear. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN

Este trabajo introduce la naturaleza de las sustancias radiactivas y de la radiación ionizante, los efectos que causa sobre la materia y los medios disponibles para su detección y medida, así como las fuentes de radiación naturales a las que los seres humanos estamos expuestos. Seguidamente, en el apartado más amplio del trabajo, se describen las múltiples aplicaciones de las radiaciones ionizantes en la medicina, la agricultura, la industria, las ciencias de la tierra, la biología y otras ramas, lo que permite poder poner su impacto en perspectiva frente al de las fuentes naturales. La tesis final del artículo es que para evitar sufrir daños resulta necesario protegerse adecuadamente de los efectos nocivos de la radiación y las sustancias radiactivas, pero sin limitar innecesariamente su utilización beneficiosa en los numerosos ámbitos descritos. Ese es el objetivo fundamental de la protección radiológica, cuyos principios básicos se presentan para terminar.

PALABRAS CLAVE: radiaciones ionizantes; fuentes de radiación; radiación natural; usos de la radiación; dosis de radiación; protección radiológica.

INTRODUCCIÓN

La radiactividad es uno de los grandes descubrimientos del hombre contemporáneo. A la par que se fueron conociendo sus efectos también se fueron encontrando aplicaciones de gran utilidad, en las que las sustancias radiactivas o los aparatos emisores de radiaciones ionizantes resultan insustituibles. Además de la medicina, la agricultura, la industria, las ciencias de la tierra, la biología y otras muchas ramas dependen hoy en día en muchos aspectos de su utilización.

Este trabajo introduce la naturaleza de las sustancias radiactivas y de la radiación ionizante, los efectos que esta causa sobre la materia y los medios disponibles para su detección y medida, así como las diferentes fuentes de radiación naturales a las que los seres humanos estamos expuestos. Seguidamente, en el apartado más amplio del trabajo, se describen las múltiples

ABSTRACT

This paper introduces the nature of the radioactive substances and of the ionising radiation, the effects that they cause on the matter and the available media for their detection and measure, as well as the sources of natural radiation, to which the human being are exposed. Next, in the more detailed part of this paper, it is described the wide range of ionising radiations uses in: medicine, agriculture, earth sciences, biology and in some other scientific fields, that allow to pose its impact in the perspective of facing the ones from natural sources. The article concludes that for avoiding damages it is necessary proper protection against the radioactive substances, but avoiding limitation their beneficial uses in the various ranges described. For finishing this paper, the basic principles of radiation protection are described, due to they are the its principal aim.

KEY WORDS: ionising radiations; radiation sources; natural radiation; radiation uses; radiation dose; radiation protection.

aplicaciones de las radiaciones ionizantes para poder poner su impacto en perspectiva frente al de las fuentes naturales. La tesis final del artículo es que para evitar sufrir daños resulta necesario protegerse adecuadamente de los efectos nocivos de la radiación y las sustancias radiactivas, pero sin limitar innecesariamente su utilización beneficiosa en los numerosos ámbitos descritos. Ese es el objetivo fundamental de la protección radiológica, cuyos principios básicos se presentan para terminar.

RADIOACTIVIDAD Y EMISIÓN DE RADIACIÓN IONIZANTE

La emisión de radiaciones ionizantes es una característica común a muchos átomos en cuyo núcleo el número de neutrones resulta escaso o excesivo, lo que los hace inestables. Esos átomos son llamados *radiactivos*. En

ellos, las ligaduras nucleares se transforman en busca de configuraciones más estables, a la vez que se libera energía, asociada a la radiación emitida. Esta puede ser de cuatro tipos fundamentales: partículas alfa (α), que consisten en dos protones y dos neutrones, con capacidad limitada de penetración en la materia, pero mucha intensidad energética; partículas beta (β), que son electrones o positrones procedentes de la transformación en el núcleo de un neutrón en un protón o viceversa, algo más penetrantes aunque menos intensas; radiación gamma (γ), que es radiación electromagnética del extremo más energético del espectro, por tanto muy penetrante; y neutrones, que al no poseer carga eléctrica también son muy penetrantes (Figura 1).

La velocidad con que dichas transformaciones tienen lugar en una sustancia radiactiva se denomina *actividad*, y se medirá como el número de átomos que se transforman o desintegran por unidad de tiempo, teniendo como unidad natural (1 desintegración/segundo) el becquerel, así llamado en honor al descubridor de la radiactividad. El becquerel es la unidad del Sistema Internacional (SI) legalmente establecida en España¹. Una unidad anteriormente utilizada, pero que no pertenece al SI, es el curio, correspondiente a la actividad existente en un gramo de ^{226}Ra ($3,7 \cdot 10^{10}$ desintegraciones/segundo). El becquerel (cuyo símbolo es Bq) es una unidad muy pequeña y de poco uso práctico (sería como medir longitudes o distancias en micras), baste decir que nuestro propio organismo contiene aproximadamente 4.000 becquerels de ^{40}K , por lo que siempre se emplean sus múltiplos. Por el contrario 1 curio (Ci) es una actividad considerable, e incluso peligrosa según las sustancias, por lo que se emplean a menudo sus submúltiplos.

La radiactividad es un fenómeno independiente de cualquier influencia externa (presión, temperatura, ilu-

minación, etc.), ya que al provenir del núcleo atómico, solo podrán modificarla aquellos agentes que sean capaces de alterar las propiedades del propio núcleo. La radiactividad tiene naturaleza aleatoria, caracterizada por la llamada *constante de desintegración radiactiva* λ , cuyo significado es la probabilidad de desintegración de un núcleo radiactivo por unidad de tiempo. Esta constante depende únicamente del tipo de nucleido y del modo de desintegración. Tiene unidades de tiempo inverso (s^{-1} , min^{-1} , h^{-1} , etc.). Su inverso representa la esperanza de vida de un átomo cualquiera, también llamada *vida media* τ .

Si se considera una sola sustancia que contenga inicialmente un número suficientemente grande de átomos radiactivos N_0 , dicho número se reduce siguiendo una ley de tipo exponencial decreciente con el paso del tiempo. El tiempo al cabo del cual el número de átomos radiactivos se reduce a la mitad se denomina *período de semidesintegración* T . Este es característico de cada radionucleido, y varía entre fracciones de segundo y millones de años. Conociendo el período se pueden hacer cálculos rápidos sobre el decrecimiento de una sustancia radiactiva, ya que al cabo de K veces el período, el número medio de átomos se habrá reducido por 2^K .

Además de mediante la desintegración radiactiva, también se generan radiaciones ionizantes cuando se consigue acelerar partículas elementales (habitualmente electrones, positrones o protones) mediante campos electromagnéticos intensos, como en el caso de los aceleradores de partículas. A las energías conferidas, dichas partículas elementales resultan ionizantes. También se emite radiación electromagnética de alta frecuencia, denominada radiación X, al producirse saltos de electrones entre distintos niveles de energía en la corteza atómica, como resultado de algunas formas

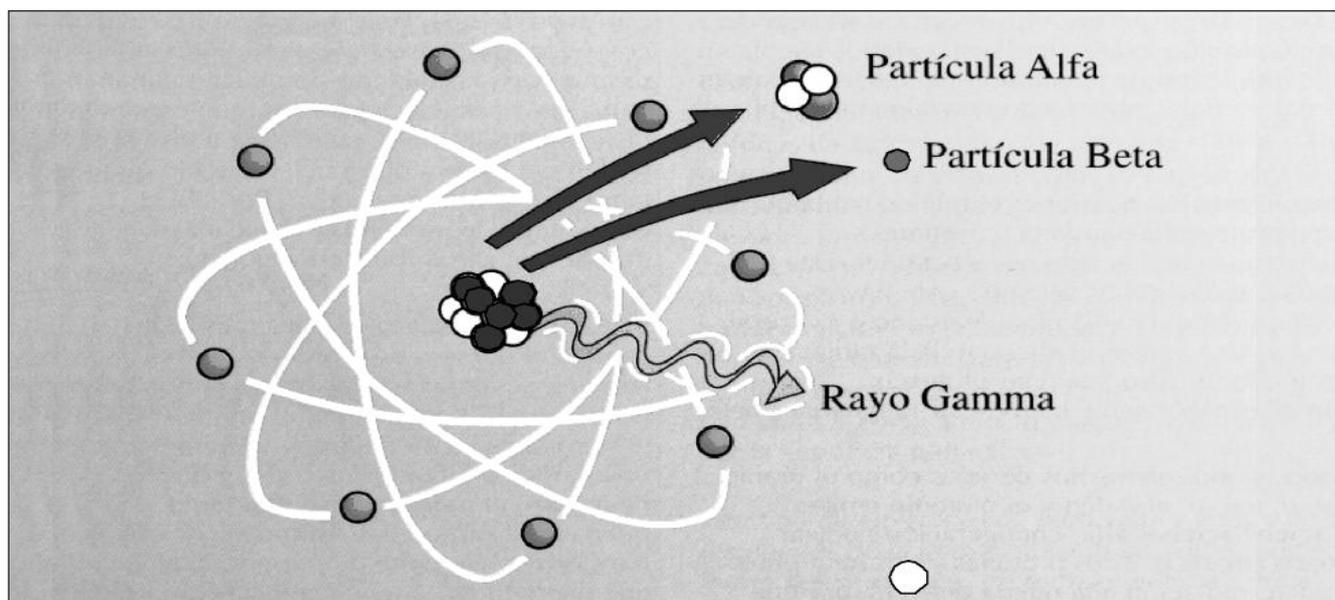


FIGURA 1. Ilustración de los distintos tipos de partículas emitidas por las sustancias radiactivas.

de desintegración radiactiva o al proyectar un haz de electrones rápidos sobre un blanco sólido denso. En general, las interacciones de partículas muy energéticas con la materia provocan reacciones que acaban liberando radiación ionizante.

INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA

A su paso por la materia, la radiación sufre distintos tipos de interacción, según su naturaleza. De todos los efectos, dado su gran impacto sobre las moléculas esenciales para la vida, destaca la *ionización*. De forma breve, se puede decir que para partículas cargadas (α y β) la interacción básica responde a la ley de Coulomb entre cargas eléctricas, la cual da lugar a dos fenómenos elementales: la *excitación atómica* (o molecular) y la *ionización*. También puede ser significativa la aceleración (o deceleración) de las partículas cargadas cuando penetran en el campo eléctrico del núcleo, lo que produce la emisión de fotones que se conocen como *radiación de frenado* (o *bremstrahlung*), siendo de mayor importancia cuanto menor masa tenga la partícula y mayor carga el átomo, es decir que tendrá importancia para partículas β , especialmente con átomos de elevado número atómico Z . En el caso particular de la radiación de tipo β^+ , los positrones se aniquilan al encontrarse con los electrones de la corteza atómica, sus antipartículas, y como resultado se emiten dos fotones de aniquilación, con una energía muy precisa (0,511 MeV) y en direcciones opuestas, lo que constituye el fundamento de la técnica PET (tomografía por emisión de positrones), descrita más adelante.

En el caso de los fotones, su energía puede ser absorbida por el medio mediante tres procesos fundamentales: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares electrón-positrón, cuyas probabilidades de ocurrencia dependen de la energía inicial de los fotones. Todos ellos originan la aparición de partículas cargadas, con lo cual dan origen posteriormente a las interacciones comentadas anteriormente, por lo que se dice que son indirectamente ionizantes. El alcance de la radiación γ en aire puede llegar a los centenares de metros, pudiendo traspasar el cuerpo humano, y hasta varios centímetros de plomo.

Con respecto a los neutrones, al carecer de carga eléctrica, solamente pueden interactuar con los núcleos de los átomos mediante las diferentes reacciones nucleares posibles (dispersión elástica e inelástica, captura radiactiva, transmutación o fisión). Puesto que los núcleos ocupan una fracción ínfima del volumen total de la materia, los neutrones podrán desplazarse distancias relativamente grandes antes de interactuar, resultando ser muy penetrantes.

ATENUACIÓN DE LA RADIACIÓN. BLINDAJE

La atenuación que sufre la radiación a su paso por la materia dependerá fundamentalmente de dos factores:

- El factor geométrico, que hace que con la distancia entre la fuente y el objeto la radiación sea cada vez más débil al disminuir el ángulo sólido abarcado, por lo que generalmente se tiene una proporción inversa al cuadrado de la distancia, según una ley ($1/4\pi r^2$).
- El factor material, que dependerá del tipo y energía de la radiación y de la composición del material, lo que afecta a la probabilidad de interacción.

Se denominan *materiales de blindaje* a aquellos capaces de atenuar la radiación hasta límites aceptables. Desde ese punto de vista, para detener la radiación α no habrá que proporcionar más que un pequeño espesor de plástico o metal. Con respecto a los emisores β , se emplearán también plásticos (metacrilato, polietileno) o metales ligeros (aluminio), recubiertos con plomo si la radiación de frenado pudiera ser intensa. En el caso de la radiación X o γ se podrán emplear agua, hormigón y metales (plomo, acero). Por último, para el manejo seguro de fuentes emisoras de neutrones el blindaje adecuado suele constar de varios centímetros de material hidrogenado (agua, parafina, polietileno), en el cual los neutrones rápidos se frenarán (moderarán) por colisiones elásticas fundamentalmente, seguido de unos milímetros de cadmio o de unos centímetros de boro (en los que se produce la captura de neutrones térmicos con una alta probabilidad), con lo cual la mayor parte de los neutrones serían finalmente absorbidos. Dichos materiales suelen completarse con otros de elevado espesor másico (plomo, acero u hormigón), a fin de atenuar los fotones emitidos en las diversas reacciones que provocan los neutrones.

SISTEMAS DE DETECCIÓN Y MEDIDA DE LA RADIACIÓN

Obviamente, la detección de la presencia de radiación ha de basarse en los efectos que produce sobre la materia. No estando dotado el organismo de sentidos para ello, ha de recurrirse a instrumentos adecuados capaces de detectar –e incluso hacer visibles– las partículas fundamentales subatómicas.

Puesto que el efecto principal causado por las radiaciones es la ionización, se utilizan mucho los detectores de ionización gaseosa formados en esencia por un recipiente que contiene un gas y dos electrodos con potenciales eléctricos diferentes. Los más sensibles se denominan *cámaras de ionización* y los más robustos y versátiles son los llamados contadores Geiger-Müller. La ionización en sólidos tiene una aplicación en el campo de los *detectores de semiconductores* (generalmente, germanio intrínseco o combinado con litio, o silicio), de elevada sensibilidad, en los que los pares

electrón-hueco formados por la ionización aumentan momentáneamente la conducción eléctrica, lo que permite detectar estas partículas. Otros contadores, llamados de *centelleo*, se basan en la ionización producida por partículas cargadas que se desplazan a gran velocidad en determinados sólidos y líquidos transparentes, conocidos como materiales centelleantes. La ionización produce destellos de luz visible que son captados por un tubo fotomultiplicador, de forma que se convierten en pulsos eléctricos que pueden amplificarse y registrarse electrónicamente. En numerosos campos de la investigación actual, el contador de centelleo resulta superior a todos los demás dispositivos de detección.

Otros detectores se llaman de *trazas*, porque permiten a los investigadores observar las trazas que deja a su paso una partícula. Las cámaras de destellos o de burbujas son detectores de trazas, igual que la cámara de niebla o las emulsiones fotográficas nucleares. Fundamentalmente se aplican en el estudio de la física de las partículas elementales.

Para contabilizar la cantidad de radiación recibida por una persona (la *dosis*), los *dosímetros* de uso más extendido se basan en el empleo de materiales *termoluminiscentes*, en los que se libera luz visible al ser calentados, mediante un proceso que implica dos pasos: a) la ionización inicial hace que los electrones de los átomos del material se exciten y salten del nivel de energía en reposo (*banda de valencia*) a otro excitado (*banda de conducción*), quedando algunos atrapados

en niveles intermedios creados por la presencia de impurezas en el cristal (*trampas*); y b) cuando se calienta el material y los electrones vuelven a su estado original, se emiten fotones de luz, que pueden ser amplificados y medidos al igual que se hace con los materiales de centelleo.

Con respecto a los neutrones, suelen detectarse de forma indirecta a partir de las reacciones nucleares que tienen lugar cuando colisionan con los núcleos de determinados átomos. Por ejemplo, en el caso de los neutrones térmicos, se producen partículas alfa, detectables con facilidad, al colisionar con los núcleos de ^3He , el ^{10}B o el ^6Li .

En la figura 2 se pueden ver distintos equipos de detección de las radiaciones habitualmente empleados en el trabajo en las instalaciones nucleares y radiactivas.

La sensibilidad de los equipos de detección y medida de radiaciones resulta muy superior a la que tienen otro tipo de sistemas, siendo capaces de detectar cantidades traza de prácticamente cualquier radionucleido. Ello los convierte en herramientas insustituibles siempre que sea necesario marcar una molécula cuyo destino final se tenga interés en conocer, sea en procesos físicos, químicos o biológicos. Por tanto, no es sorprendente el uso de los radisótopos en investigación. Esa misma sensibilidad hace posible la detección de los radionucleidos artificiales en el medio ambiente en cantidades millones de veces inferiores a las que pudieran resultar tóxicas. Así, por ejemplo, los valores recomen-



FIGURA 2. Sistemas de detección de la radiación habituales en protección radiológica: cámara de ionización; detector Geiger; monitor de contaminación, de centelleo; dosímetros termoluminiscentes; monitores de neutrones.

datos de los límites inferiores de detección (LID) para los programas de vigilancia radiológica ambiental están comprendidos entre las milésimas y las cienmilésimas de becquerel por metro cúbico de aire² o de las décimas de becquerel por litro para el agua y la leche.

DOSIS DE RADIACIÓN

Puesto que para la determinación de los efectos biológicos producidos por la radiación ha de cuantificarse la cantidad o dosis recibida en el órgano u órganos afectados, se definen y utilizan las magnitudes apropiadas, que se resumen en la tabla 1.

Así, la *dosis absorbida* sería una medida de la energía depositada por unidad de masa, siendo utilizada generalmente cuando se estudian los efectos sobre un tejido u órgano individual, mientras que la *dosis equivalente* considera ya el tipo de radiaciones y su potencial daño biológico, por lo que constituye un mejor índice de la toxicidad de las radiaciones. Las unidades de medida correspondientes, el gray (Gy) para *dosis absorbida* y el sievert (Sv) *dosis equivalente*, resultan ser muy elevadas para su utilización práctica, por lo que se emplean mucho más sus submúltiplos el miligray (mGy) y el milisievert (mSv), que son la milésima parte de la unidad original.

En la *dosis efectiva* se tiene, además, una medida del riesgo de desarrollo de cánceres o daños hereditarios, en la que se asigna un peso diferente a la dosis equiva-

lente recibida por cada órgano, según el riesgo asociado a su irradiación. Con ello, este resulta ser el índice de toxicidad más completo, especialmente si se realiza el cálculo de la dosis recibida en el organismo desde el momento de la ingestión o inhalación de productos radiactivos hasta su completa eliminación. Esta medida la ofrece la dosis efectiva comprometida, que será el índice empleado con carácter más general.

Finalmente, un concepto muy utilizado es el de la llamada *dosis colectiva*, que será la suma de las dosis (generalmente se aplica a la dosis efectiva) recibidas por un colectivo de población que esté expuesta a una misma fuente de radiación. Con la *dosis colectiva* se pueden establecer comparaciones útiles con respecto al impacto producido por las distintas fuentes de cara a su optimización.

FUENTES NATURALES DE RADIACIÓN IONIZANTE

La presencia de la radiación ionizante es una constante en nuestro mundo y en el universo. Para conocer la magnitud y estudiar los posibles impactos de la exposición a radiaciones ionizantes, la Asamblea General de la ONU estableció en 1955 un comité científico para el estudio de los efectos de la radiaciones atómicas (UNSCEAR). Dicho comité informa cada año a la Asamblea General y periódicamente publica evaluaciones, incluyendo anexos técnicos³, basadas en los resul-

TABLA 1. Magnitudes de dosis de radiación empleadas en protección radiológica y sus unidades de medida

MAGNITUD	DEFINICIÓN	UNIDADES
Dosis absorbida (D)	Cociente entre la energía media impartida por la radiación ionizante a la materia en un elemento de volumen, y la masa del mismo.	Unidad del S. I.: gray (Gy) 1 Gy = 1 J/kg Unidad histórica: rad 1 rad = 0,01 Gy
Dosis equivalente (H)	Es una ponderación de la dosis absorbida en un tejido u órgano T, para tener en cuenta el tipo de radiación, de acuerdo con su potencialidad para producir efectos biológicos. $H_T = D_{TR} \cdot W_R$ W_R - Factor de ponderación de la radiación	Unidad del S.I.: sievert (Sv) 1 Sv = 1 J/kg Unidad histórica: rem 1 rem = 0,01 Sv Valores de W_R: 1 Radiación X, beta, gamma, electrones y positrones. 5 Protones 5 a 20 Neutrones, según su energía 20 Radiación alfa, núcleos pesados
Dosis efectiva (E)	Es una suma ponderada de las dosis equivalentes recibidas por los distintos tejidos y órganos del cuerpo humano. $E = \sum w_T \cdot H_T$ Los factores w_T son representativos del detrimento, o contribución al riesgo total de daños biológicos, que supone la irradiación de cada órgano individual.	Sievert (Sv) Valores de w_T: 0,01 Superficie huesos, piel 0,05 Bazo, mama, hígado, esófago, tiroides y RESTO 0,12 Colon, pulmón, médula roja, estómago 0,20 Gónadas

tados obtenidos en los diversos países. Dichas evaluaciones constituyen la base científica de las normas de protección radiológica.

A partir del último informe de UNSCEAR³, las principales fuentes de radiación naturales, junto con su contribución a la dosis recibida anualmente por la población, según se resume en la tabla 2, son las siguientes:

- En primer lugar, el Sol y el espacio exterior, de donde procede la llamada *radiación cósmica*, que para una persona media de la Tierra supone un 13% de la dosis recibida anualmente (0,4 mSv al año).
- La propia Tierra, en cuya corteza hay grandes cantidades de uranio, torio y otros elementos radiactivos que impregnan de radiactividad todo sobre el planeta (incluyendo nuestro propio organismo). Del suelo y de los materiales de construcción se recibe radiación, que causa un 17% de la dosis promedio mundial (0,5 mSv al año). Esta contribución se reparte de manera muy irregular.
- Además el uranio, al desintegrarse de forma natural, provoca la aparición del gas radón, que se difunde a través de las grietas y poros del suelo y de los materiales de construcción, alcanzando el aire que respiramos, siendo especialmente importante su influencia en el interior de los edificios, ya que al aire libre se dispersa con más facilidad. Los productos de la desintegración del radón, sus descendientes, son también radiactivos, pero ya sólidos, y quedan normalmente unidos a las partículas de polvo presentes en el aire. Las cantidades de radón, torón (fruto de la desintegración del torio) y sus descendientes varían enormemente según el tipo de rocas que formen el suelo y los materiales con que estén construidos los edificios, como también influye mucho el tipo de ventilación de los mismos. Estos contribuyen aproximadamente al 40% de la dosis promedio mundial (con 1,2 mSv al año).
- Por último, con los alimentos y bebidas también ingerimos radionucleidos naturales, destacando el uranio y sus descendientes y sobre todo el ⁴⁰K. Algunas aguas minerales, procedentes de macizos graníticos ricos en uranio y ciertos alimentos como el marisco, son especialmente ricos en material radiactivo natural. Esta contribución viene a suponer el 10% de la dosis media mundial (0,3 mSv al año).

Las variaciones de la dosis debida al fondo natural de radiación son tremendamente variables y, si bien el promedio en el mundo es de 2,4 mSv por año, los rangos típicos van desde 1 hasta 10, con algunas ubicaciones (en India, Irán, China, Brasil...) que arrojan valores excepcionalmente altos, del orden incluso de los 100 mSv por año.

Por su parte, entre las fuentes de radiación ionizante producidas por el hombre destacan especialmente las de utilización médica, que son descritas en el siguiente apartado. Las aplicaciones médicas representan un 20% (0,6 mSv al año) en el promedio de dosis mundial, con un irregular reparto geográfico, relacionado con el nivel de desarrollo de los países.

APLICACIONES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Las aplicaciones de la radiactividad y las radiaciones ionizantes se basan en sus propiedades y en los efectos que causan sobre la materia. El catálogo de aplicaciones es muy extenso y no se pretende detallarlo al completo. No obstante, en este apartado se describen las principales. Como introducción, podemos citar las siguientes aplicaciones y las propiedades en las que se basan:

- Los rayos X permiten la visión de las estructuras internas del cuerpo humano (radiodiagnóstico médico) y de cualquier pieza o material (radiografía industrial).
- Los rayos X combinados con los ordenadores permiten obtener imágenes 3-D de las estructuras internas (tomografía computarizada o TC).
- La difracción de rayos X y otras radiaciones permite determinar la estructura de cristales y moléculas, incluyendo la del ADN.
- Los isótopos radiactivos aplicados a la medicina permiten estudiar las funciones de los órganos *in vivo* (medicina nuclear).
- La emisión de radiaciones características permite emplear los radionucleidos como trazadores en múltiples campos (biológico, sanitario, medioambiental, industrial...).
- Los daños que la radiación ionizante causa en tejidos vivos permiten destruir tejidos enfermos (radioterapia contra el cáncer).

TABLA 2. Fuentes naturales de radiación. Evaluación de UNSCEAR 2008³

Fuente	DOSIS MEDIAS MUNDIALES	
	Dosis efectiva (mSv por año)	Rango típico (mSv por año)
Exposición externa		
Rayos cósmicos	0,4	0,3-1
Rayos gamma terrestres	0,5	0,3-0,6
Exposición interna		
Inhalación	1,2	0,2-10
Ingestión	0,3	0,2-0,8
Total	2,4	1-10

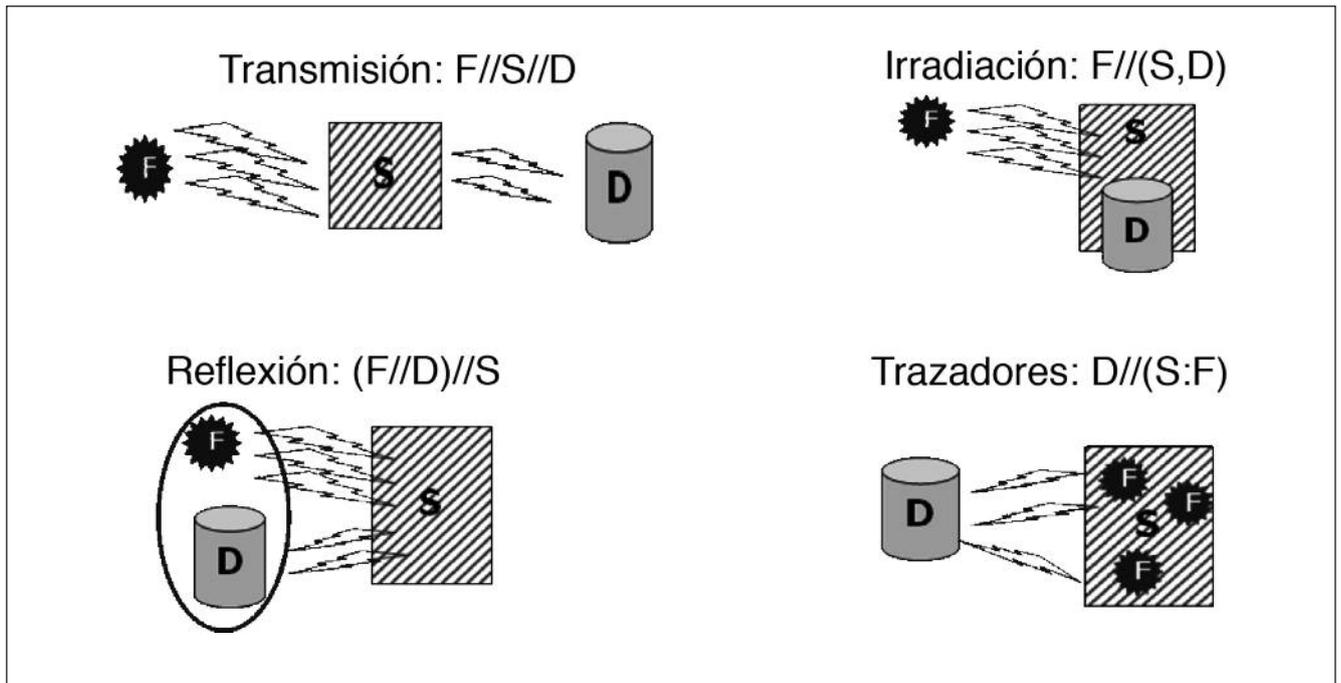


FIGURA 3. Clasificación de los tipos de aplicaciones de las radiaciones ionizantes según la configuración de la fuente (F), el sistema material (S) y el detector (D).

- La capacidad de la radiación ionizante para esterilizar permite evitar enfermedades en numerosos campos (sanitario, agropecuario, alimentario).
- La capacidad de la radiación ionizante para alterar los materiales permite obtener compuestos avanzados para diferentes aplicaciones.
- La desintegración y decaimiento radiactivo permiten la datación de minerales y restos arqueológicos.
- Las reacciones nucleares activan átomos y permiten análisis de gran sensibilidad incluso en muestras microscópicas.
- La energía nuclear permite cubrir una parte importante de las necesidades mundiales sin agotar recursos fósiles no renovables y sin emitir gases causantes del efecto invernadero.

En toda aplicación concurren tres elementos fundamentales: la fuente radiactiva (F), el detector de la radiación (D) y el sistema material (S) al cual se aplica la acción de la fuente. Las configuraciones topológicas en las que pueden disponerse los tres elementos básicos que acabamos de comentar (la fuente, el detector y el sistema) son las que se describen a continuación y se representan esquemáticamente en la figura 3:

- La configuración de transmisión, que pueden representarse en la forma F//S//D, para indicar que el sistema S está físicamente separado de la fuente F y del detector D, e interpuesto entre ellos.
- La configuración de reflexión, que puede representarse en la forma (F//D)//S, para indicar que la fuente F y el detector D, aunque separados físicamente, están situados en el mismo semiespacio libre, justamente el opuesto al que ocupa el sistema material S.

- La configuración de irradiación, propia de las aplicaciones de los irradiadores, que se puede representar en la forma F//(S, D), para indicar que el sistema S y el detector D que le acompaña, están separados de la fuente F.
- Por último, las aplicaciones de los trazadores pueden representarse mediante una configuración de la forma D//(S:F), para indicar que la fuente F está diluida en el sistema S, mientras el detector D permanece separado e independiente.

Las aplicaciones requieren disponer de los isótopos necesarios o de los equipos emisores de radiación. Para algunas aplicaciones, las radiaciones necesarias pueden generarse en aparatos emisores como los tubos de rayos X o los aceleradores. La producción de radioisótopos requiere disponer de pequeños reactores de investigación o de aceleradores de electrones, protones u otras partículas dedicados a ello, junto con las instalaciones de separación radioquímica. En general los producidos en reactores son isótopos ricos en neutrones y se desintegran por emisión beta (β^-), que es el resultado de la conversión de un neutrón en un protón, en el interior del núcleo atómico; sus costes de producción son bajos y todas las fuentes intensas (^{60}Co , ^{192}Ir , ^{137}Cs , ^{90}Sr , etc.) y los trazadores de mayor consumo (^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{99}Mo , ^{131}I , etc.) son de esta procedencia. Los segundos son ricos en protones y se desintegran por emisión de positrones (β^+), que convierten protones en neutrones dentro del núcleo; si bien sus costes de producción son más elevados, con los aceleradores se pueden obtener isótopos radiactivos muy empleados en el diagnóstico médico.

LAS RADIACIONES IONIZANTES EN MEDICINA*

La utilización de las radiaciones en medicina supone con mucho la mayor fuente de exposición a las radiaciones de origen artificial. Este es un campo en continua evolución y según los últimos datos del UNSCEAR³, en 2008 el promedio anual de procedimientos médicos con radiaciones ionizantes supera los 3.600 millones, frente a los 2.400 millones que se constataban en el periodo 1991-1996⁴. La mayoría son estudios diagnósticos con rayos X (de ellos, 3.143 millones corresponden a estudios de diagnóstico con rayos X, 480 millones a procedimientos de radiología dental), 32,7 millones en medicina nuclear, y unos 5,1 millones de tratamientos de radioterapia. Si bien el reparto por países es muy desigual debido a las diferencias socioeconómicas, en promedio, por cada 1.000 personas, anualmente se realizan 488 exploraciones de diagnóstico y 74 exámenes dentales.

Los datos de España³ indican que en nuestro país se hacen anualmente 44 millones de exploraciones de rayos X (de ellas, casi 5 millones son radiografías dentales), 810.000 procedimientos diagnósticos de medicina nuclear y unos 82.000 tratamientos de radioterapia.

El uso médico de las radiaciones ionizantes supone un pequeño riesgo que está ampliamente compensado por el beneficio que se obtiene del diagnóstico o del tratamiento. La aceptación social del uso de las radiaciones en medicina es muy amplia, aunque en los últimos años la cultura de la calidad y de la seguridad ha impulsado la elaboración de recomendaciones y normativa específica para la protección radiológica de los pacientes.

MEDICINA NUCLEAR

El término *medicina nuclear* abarca todas las aplicaciones médicas de los isótopos radiactivos, destacando entre ellas las de fines diagnósticos. Para ello, se "marcan" determinados fármacos con radionucleidos y se administran a los pacientes por vía parenteral o endovenosa (en actividades relativamente bajas, del orden de unas centenas de MBq). Una vez metabolizados en el órgano o tejido de interés, se mide la radiación gamma que emiten para formar imágenes planas (gammagrafías) con sistemas detectores llamados gammacámaras, o se hacen reconstrucciones tridimensionales con técnicas de SPECT (*Single Photon Emission Computed Tomography*) o las más modernas técnicas de PET (*Positron Emission Tomograph*). En este último caso se emplean isótopos emisores de positrones, que al aniquilarse con un electrón producirán dos fotones de 511 keV emitidos en la misma dirección

y sentidos opuestos que permiten obtener imágenes con mejor resolución espacial. Los sistemas de formación de imagen para SPECT, y especialmente para PET son más complejos que los utilizados para las gammagrafías y requieren varias gammacámaras que pueden girar alrededor del paciente o anillos de detectores que rodean al paciente.

En medicina nuclear se obtienen imágenes básicamente funcionales y con poca resolución espacial, si bien ya existen técnicas de fusión de imagen (e incluso equipos que permiten obtener de forma simultánea ambos tipos de imágenes) que permiten combinar las imágenes morfológicas (con gran resolución espacial) con las funcionales.

Los radionucleidos que se utilizan para la formación de imágenes en medicina nuclear deben reunir unas características físicas que permitan conseguir el objetivo diagnóstico con la mínima exposición del paciente, de los trabajadores sanitarios, familiares y acompañantes del paciente. Así, deben emitir radiación que atraviese con facilidad los tejidos del cuerpo humano y que sea detectada con eficiencia por los dispositivos que formarán la imagen, lo que normalmente supone utilizar radiación de fotones en el rango de los 100-500 keV. Además deben tener un periodo de semidesintegración adecuado al tiempo de duración de la exploración (algunas horas). El isótopo más utilizado es el ^{99m}Tc aunque también se utilizan el ⁶⁷Ga, ²⁰¹Tl, ¹³¹I, ¹²⁵I, ¹²³I, ¹¹¹In y otros.

Estos procedimientos de diagnóstico que utilizan fuentes radiactivas no encapsuladas requieren instalaciones y personal especializado, ya que se puede producir un cierto nivel de contaminación radiactiva. Los pacientes y sus excretas son, durante un cierto tiempo (hasta que el material radiactivo se haya desintegrado), emisores de radiación ionizante y deben ser gestionados con las debidas precauciones.

Estudios *in vitro*. Radioinmunoanálisis (RIA)

El marcado de moléculas con radioisótopos permite análisis tanto cualitativos como cuantitativos, así como la detección en sangre de hormonas peptídicas, esteroideas, drogas, antígenos tumorales, etc. en cantidades muy pequeñas (10 a 100 millones más sensible que otros métodos). Por ello, tiene campo de aplicación para endocrinología, hematología, oncología, virología, toxicología, farmacología, alergología, etc. Se utilizan emisores beta y gamma de baja y media energía, fundamentalmente ¹²⁵I, ³H, ¹⁴C, ³²P, ⁵⁷Co, etc. con periodos de semidesintegración que pueden ser más largos (días e incluso años) que los de aquellos isótopos usados en las técnicas de diagnóstico *in vivo*.

Radioterapia metabólica

Los isótopos radiactivos se emplean también con fines terapéuticos, mediante la inyección o ingestión de ra-

*Las líneas generales de este apartado se han basado en un trabajo del prof. E. Vaño⁵, adaptado y actualizado en lo necesario.

diofármacos que actúen sobre el órgano diana al seguir la misma vía metabólica que el elemento estable. Así, por ejemplo, se utiliza el ^{131}I para el tratamiento de determinados cánceres de tiroides ya que son capaces de metabolizar activamente este elemento produciendo la destrucción selectiva de las células que lo incorporan. El ^{153}Sm se aplica en la terapia paliativa del dolor óseo por metástasis (cáncer de próstata y de mama). También se está explorando el tratamiento de artritis reumatoide y otras enfermedades osteo-articulares mediante radiosinovectomía con ^{153}Sm , ^{166}Ho , ^{90}Y o ^{186}Re .

RADIODIAGNÓSTICO

En medicina, los rayos X se utilizan básicamente, para el diagnóstico médico y como guía (fluoroscopia) para algunos procedimientos terapéuticos (radiología intervencionista). La radiación electromagnética se emite desde una fuente externa al organismo (un tubo de rayos X). Al atravesar el cuerpo humano, el haz de radiación se absorbe más o menos según los órganos y tejidos atravesados, y al llegar al “detector” (película radiográfica u otros tipos de detectores de radiación) se obtiene una imagen en la que los diferentes contrastes indican la mayor o menor absorción de la radiación. Se obtienen imágenes planas (radiografías) o reconstrucciones tridimensionales a partir de varias imágenes de cortes transversales del volumen explorado (tomografía computarizada, TC).

Con ambas técnicas se puede trabajar en “diferido” (se hace el diagnóstico una vez obtenida la imagen), o en “tiempo real” con equipos de fluoroscopia (las imágenes se visualizan mientras se administra un medio de contraste al paciente por vía digestiva, arterial o venosa).

Radiología digital

Las técnicas digitales para la obtención, procesado, transmisión y almacenamiento de imágenes médicas han tenido un gran impacto en el diagnóstico médico y lo seguirán teniendo en los próximos años. Su introducción ha significado una revolución en la radiología, ya que las imágenes se obtienen con más facilidad y rapidez, se pueden procesar numéricamente, se pueden transmitir por la red, ser almacenadas en formato electrónico y recuperarlas con rapidez.

La introducción de la radiología digital aporta innumerables ventajas para el diagnóstico, pero hace que la protección radiológica del paciente cobre una especial relevancia. Esta tecnología permite que las dosis a los pacientes sean similares e incluso en algunos casos inferiores a las que se imparten con radiología convencional para un nivel comparable de calidad de imagen. En la radiología convencional las dosis a los pacientes que permiten obtener imágenes de calidad razonable quedan restringidas a un margen relativamente estrecho por la sensibilidad de los conjuntos cartulina-película, de manera que un aumento de dosis de radiación

supone una sobreexposición en la imagen (demasiado “negra”) y una disminución de dosis supone una subexposición (demasiado “clara”). Por su lado, los sistemas digitales tienen un rango dinámico mucho más amplio, lo que permite obtener buenas imágenes tanto con dosis más pequeñas como si son bastante mayores que las utilizadas en radiología convencional. Para alcanzar la saturación del sistema es necesario aumentar las dosis significativamente. Por el contrario, bajos niveles de dosis repercuten en la imagen en forma de un aumento del “ruido”, lo que puede conducir a que exista una cierta tendencia a incrementar las dosis voluntariamente buscando imágenes de más calidad.

Radiología intervencionista

En las técnicas intervencionistas se utilizan las imágenes de fluoroscopia (o de TC) en tiempo real, como guía de un procedimiento terapéutico, como por ejemplo el avance de un catéter por una arteria, el inflado de un balón para dar más luz a una arteria con estenosis, la colocación de dispositivos (*stents*) que eviten que las arterias se cierren de nuevo, la embolización de arterias para evitar lesiones por malformaciones arteriovenosas o para hacer que un tumor se necrose por isquemia, etc.

Estos procedimientos están teniendo un aumento espectacular en los últimos años, a pesar de que en ocasiones suponen dosis de radiación elevadas para los pacientes y para los especialistas médicos que las realizan. Los procedimientos intervencionistas sustituyen en ocasiones a la cirugía abierta y pueden ser, a veces, la única alternativa para pacientes que no tolerarían un proceso quirúrgico complejo con su correspondiente anestesia.

Tomografía computarizada

La TC obtiene imágenes de secciones del cuerpo del paciente representando claramente su aspecto incluidos los tejidos blandos. Por tanto, proporciona un rango dinámico más amplio que la radiografía convencional, con una superior discriminación de tejidos. El avance de la tecnología, al combinar el empleo de detectores cada vez de menor tamaño con sistemas informáticos de reconstrucción de imagen muy sofisticados, permite obtener cortes anatómicos muy finos o reconstrucciones tridimensionales de la zona estudiada, de tal manera que se ha convertido en alternativa real a la cirugía exploratoria. Además, permite estancias más reducidas de los pacientes en lo que respecta a la fase preoperatoria. En diversas localizaciones tumorales se ha convertido en una herramienta indispensable y cada vez es mayor su necesidad en la planificación de tratamientos con radioterapia.

Sin embargo, su gran potencia como herramienta para el diagnóstico no debe hacer olvidar que en una exploración de TC el paciente puede recibir una dosis de radiación equivalente a la de cientos de radiografías. Por

ello, su empleo cada vez más frecuente está haciendo que la TC sea la fuente de radiación de origen artificial que mayor incremento ha experimentado en los países desarrollados. Por ejemplo, en los EE. UU. se ha convertido en la fuente artificial de exposición humana más intensa en términos absolutos, suponiendo ella sola el 24% de la dosis colectiva de aquel país⁶, en el que en 2006 se realizaron del orden de 67 millones de exploraciones mediante TC.

LAS RADIACIONES IONIZANTES EN RADIOTERAPIA

Las radiaciones ionizantes se utilizan en radioterapia para tratar tanto procesos de naturaleza benigna (malformaciones vasculares; tumores benignos tales como neurinomas, meningiomas, adenomas, etc; queloides; inhibición de osteoformación, etc.) como maligna (diferentes tipos de cáncer). Se emplean fuentes radiactivas de gran actividad o aceleradores de partículas para producir haces de radiación con los que irradiar los llamados volúmenes “blanco”, habitualmente desde el exterior del paciente (radioterapia externa o teleterapia). Cuando las fuentes radiactivas encapsuladas se introducen en el interior del organismo para irradiar tumores a distancias muy pequeñas se habla de tratamientos de braquiterapia. También, como se vio anteriormente, para algunas enfermedades puede ser eficaz la radioterapia metabólica, en la que se inyectan o ingieren radiofármacos específicos.

En radioterapia externa se usan tanto radiaciones electromagnéticas como corpusculares (sobre todo electrones). En algunos países se han puesto a punto programas de tratamiento mediante partículas cargadas y neutrones. Las partículas cargadas pesadas (protones o iones de C principalmente) permiten impartir directamente una mayor fracción de energía sobre el tejido blanco, afectando menos a los tejidos periféricos. Los neutrones pueden ser absorbidos selectivamente si se emplean fármacos en cuya composición haya absorbentes neutrónicos intensos, como el boro.

El gran reto en radioterapia consiste en administrar la dosis suficiente al tumor maligno para destruirlo (ya que una dosis menor supone en general un tratamiento ineficaz) con dosis de radiación lo más pequeñas posible a los tejidos sanos que están en las proximidades del tumor y protegiendo especialmente los órganos críticos más radiosensibles que, si se irradian, podrían causar efectos especialmente nocivos en el paciente (por ejemplo, dosis altas en recto y vejiga en los tratamientos del cáncer de próstata, etc.). Este reto se resuelve con instalaciones cada vez más sofisticadas, con personal muy bien formado y con procedimientos de control de calidad muy estrictos.

Una vez localizado el volumen a irradiar y los órganos críticos que se deben proteger (todo ello en base a imá-

genes del paciente previamente obtenidas habitualmente con un TC), se procede a la planificación óptima del tratamiento radioterápico utilizando ordenadores y programas de cálculo que permiten evaluar las diferentes opciones en cuanto a dirección, tamaño, y energía de los campos de radiación, duración de las diferentes sesiones, etc. Posteriormente se procede al tratamiento radioterápico propiamente dicho según la planificación establecida, una vez realizadas las oportunas verificaciones con el auxilio de imágenes radiográficas o de TC e inmovilizando al paciente cuando proceda.

En braquiterapia se utilizan las técnicas llamadas de alta tasa de dosis. Una vez hecha la oportuna planificación, se introduce en el paciente (ayudándose en ocasiones de anestesia) una guía o posicionador que permitirá posteriormente, una vez que el operador haya salido de la sala de tratamiento (si se utilizan fuentes gamma), que la fuente radiactiva se traslade de forma automática desde su posición de almacenamiento en un contenedor debidamente blindado, hasta la posición de tratamiento (en el esófago, útero, pulmón, etc.) donde permanecerá el tiempo adecuado para depositar la dosis requerida, regresando después de nuevo a su posición de almacenamiento.

Una técnica que se ha desarrollado durante los últimos años es la braquiterapia intravascular (sobre todo en el terreno coronario, en donde se habla de braquiterapia intracoronaria). Se ha comprobado que se pueden evitar muchos casos de reestenosis (disminución del diámetro de las arterias una vez que se han dilatado con balones u otros dispositivos) irradiando las paredes de las arterias con dosis de radiación entre 20 y 25 Gy. Para ello se utilizan fuentes radiactivas (emisores beta o incluso gamma) de pequeño diámetro que se hacen llegar con catéteres introducidos percutáneamente por vía femoral retrógrada hasta la posición de la lesión, donde permanecen unos pocos minutos hasta administrar la dosis prescrita. En estas técnicas, típicamente multidisciplinares, deben participar especialistas en cardiología, en oncología radioterápica y en radiofísica para conseguir resultados adecuados.

Dadas las altas dosis de radiación que se utilizan en radioterapia, los aspectos de seguridad son de crucial importancia. No se pueden cometer errores, ya que cualquier error puede suponer un accidente de fatales consecuencias. Los operadores de las instalaciones de radioterapia tienen una responsabilidad similar a los pilotos de los aviones: habitualmente no existe la opción de una “segunda oportunidad”.

ESTERILIZACIÓN DE MATERIAL QUIRÚRGICO E IMPLANTES

Basándose en la acción bactericida de la radiación, utilizando elevadas actividades de emisores gamma se pueden esterilizar materiales de uso quirúrgico e im-

plantes, lo cual presenta grandes ventajas frente a la esterilización por calor o mediante productos químicos. La eficacia del método y su competitividad, desde el punto de vista económico, en relación con los métodos tradicionales, ha dado origen a un gran desarrollo de las plantas industriales de irradiación, basadas en el empleo de fuentes encapsuladas generalmente de muy alta actividad (del orden de los PBq) de ^{60}Co o ^{137}Cs . También se emplean aceleradores de partículas, habitualmente electrones, con ese mismo fin.

LAS RADIACIONES IONIZANTES EN LA INDUSTRIA

Dentro del capítulo de aplicaciones industriales hay que destacar su utilización para realizar ensayos no destructivos, para medir y controlar procesos, para estudiar procesos mediante trazadores o para producir materiales de propiedades especiales mediante irradiación.

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Con este fin se emplean equipos de rayos X, fuentes emisoras γ de intensidad moderada, miniaceleradores o incluso fuentes de neutrones con los que producir imágenes al atravesar la radiación el objeto en estudio. Su finalidad suele ser habitualmente la inspección detallada de soldaduras, defectos de fabricación, etc. En algunos sectores industriales esta inspección resulta ser un elemento clave para garantizar la seguridad, por ejemplo: en los empalmes de tuberías en oleoductos o gaseoductos, en la fabricación y montaje de los sistemas de refrigeración de los reactores nucleares, en construcciones de estructuras metálicas, etc. Sin embargo, dado que en muchas de estas aplicaciones se requiere emplear fuentes portátiles, es imprescindible extremar las precauciones en su manejo para garantizar la protección radiológica de los trabajadores y de las personas que puedan encontrarse en las proximidades. Fuera de su aplicación, el control de las fuentes de gammagrafía industrial debe ser muy estricto, debiendo transportarse en sus contenedores de blindaje y extremarse las precauciones desde el punto de vista de la seguridad física.

INSTRUMENTOS MEDIDORES

Se emplean fuentes radiactivas encapsuladas, junto con los detectores apropiados, en muchas aplicaciones en las que resulta necesario determinar niveles, espesores, densidades, etc. Habitualmente esas fuentes forman parte de los sistemas de control automático de diferentes procesos industriales.

Así, la medida y control de nivel mediante el empleo de fuentes de radiación se basa en la absorción o en la retrodispersión de la radiación en la materia. Los proce-

dimientos utilizados son muy variados y vienen caracterizados por las posiciones en que se coloca la fuente radiactiva y el detector. La absorción suele emplearse en el control de llenado de botellas de líquidos, como bebidas. La retrodispersión de la radiación se emplea para medidas de nivel en pozos o depósitos subterráneos. También se emplea en el llenado de botellas de gas, envasado de productos, determinación del nivel de carga en altos hornos, etc. En general, este método es especialmente útil en los casos de líquidos a elevadas temperaturas, líquidos corrosivos, tanques o recipientes a presión y en todos aquellos casos donde sea imposible o indeseable la utilización de dispositivos de contacto.

La técnica de medida de espesores y densidades se basa en que la intensidad o densidad del flujo de radiación que se transmite o refleja, cuando la radiación atraviesa un material, depende de la densidad del aire y espesor de dicho material. Esto se aplica al control de máquinas de laminado de metales, producción de papel, plásticos, llenado de cigarrillos, etc.

Por su parte, para la determinación de la humedad se emplean fuentes de neutrones (como por ejemplo las de $^{241}\text{Am-Be}$) y se basa en la moderación de los neutrones rápidos al chocar con los átomos de hidrógeno del agua. Este método es de muy extendida aplicación en análisis de suelos y en construcción de carreteras.

EMPLEO DE TRAZADORES

Para utilizar radioisótopos como trazadores, estos se deben incorporar a un material para seguir y estudiar el curso o comportamiento de este, mediante la detección de las radiaciones. Para ello se pueden seguir métodos físicos (mezclado) o químicos (formación de moléculas con el isótopo). Las posibilidades de aplicación son prácticamente ilimitadas, empleándose en el estudio del transporte de fluidos –medida de caudales, tiempo de residencia, modelos de circulación, control de transporte en oleoductos, en estudios de desgaste y fricción en componentes y piezas metálicas de máquinas tales como: segmentos de pistones, álabes de turbogeneradores, palieres, estudio del comportamiento de lubricantes, investigación de procesos químicos, permitiendo estudiar la cinética y mecanismos de reacción.

TRATAMIENTO DE MATERIALES

La radiación gamma ioniza la materia y crea radicales libres, que son las especies intermediarias de muchas reacciones químicas. Aplicada la radiación (fuentes de ^{60}Co) a los monómeros con los que se fabrican los plásticos se induce la formación de grandes cadenas poliméricas. Si se continúa la irradiación del material se forman plásticos especiales de alto grado de entrecru-

zamiento catenarío, que mejora considerablemente sus propiedades como aislante térmico y eléctrico. Así, por ejemplo, a partir del polietileno se fabrican tuberías, revestimientos de cables, materiales con “efecto memoria”, elastómeros, piezas para motores de automóvil, etc. O partiendo de la fibra de carburo de silicio se consiguen materiales cerámicos de alta resistencia al calor, como las placas de revestimiento de las lanzaderas espaciales.

OTRAS APLICACIONES

En este grupo se pueden citar varias aplicaciones basadas en la acción ionizante de la radiación, las cuales en general utilizan actividades muy bajas de emisores alfa y beta, tales como la eliminación de electricidad estática, la producción de materiales luminiscentes, los detectores de humo, etc.

La eliminación de la electricidad estática es de utilidad en aquellos casos en los que la acumulación de la misma provoca grandes inconvenientes en los procesos industriales: fabricación textil, de materiales plásticos, de papel, vidrio, etc. Asimismo, es de utilidad en aquellas industrias en las que se utilizan grandes volúmenes de material inflamable y en otras en las que pueden provocarse explosiones por salto de chispa eléctrica. En este caso se utilizan emisores alfa y beta: ^3H , ^{85}Kr , ^{90}Sr y ^{241}Am .

La propiedad de las partículas α y β de producir fenómenos de luminiscencia en algunos materiales se utiliza para producir señales luminiscentes de utilidad para su empleo en aviones, barcos, ferrocarril, etc. Se utilizan isótopos como ^3H , ^{85}Kr , ^{90}Sr y ^{147}Pb , etc.

Para los detectores de humo, se coloca en el interior de una cámara un emisor α o β , que dé lugar a una corriente de ionización constante. La presencia de humo en la cámara atenúa la radiación y provoca una disminución de la corriente de ionización, que se puede detectar con un aparato de medida adecuado. La fuente radiactiva más utilizada es ^{241}Am .

SEGURIDAD FÍSICA

La aplicación de las radiaciones ionizantes como medio de inspección para prevenir actividades ilegales está muy extendida en todo el mundo. Habitualmente se utilizan equipos de rayos X para inspección de bultos o equipajes como medida de seguridad frente a la introducción de armas o explosivos en edificios públicos, aviones, trenes, etc. Esos equipos se basan en la transmisión de la radiación. También en algunos países se han venido usando sistemas de rayos X convencionales aplicados a la inspección de personas, por ejemplo en algunas minas de diamantes para radiografiar a los trabajadores a su salida del trabajo

con el propósito de impedir que oculten diamantes en sus cavidades corporales, y en algunas cárceles se radiografían a los presos y a sus visitantes para detectar armas ocultas.

Recientemente se está iniciando en varios países la implantación de equipos para inspección de personas basados en la retrodispersión de rayos X. Esos equipos emiten un haz muy estrecho de rayos X en forma de puntero que se dirige hacia la persona a inspeccionar, realizando un barrido sobre toda la superficie del cuerpo de la misma; para una adecuada inspección, es necesario escanear las partes delantera y posterior del cuerpo. Los detectores de radiación se colocan junto a la fuente emisora de rayos X, para recoger la radiación retrodispersada y formar la imagen a partir de ella. Con este sistema se pueden detectar objetos metálicos y no metálicos ocultos bajo la ropa, incluyendo pistolas, cuchillos, explosivos, drogas y armas fabricadas en plástico y cerámica, que se hacen visibles en la imagen de retrodispersión de rayos X porque poseen diferente composición atómica que el cuerpo. Los objetos ligeros se observan en la imagen más brillantes que los tejidos del cuerpo; por el contrario, los objetos pesados, como los metales, aparecen más oscuros que aquellos. La dosis de radiación que la persona recibiría en un escáner de este tipo en funcionamiento normal es variable desde un mínimo de aproximadamente 0,03 microsieverts por escáner.

Para inspeccionar cargamentos hay varios sistemas⁷, según se trate de camiones o coches, contenedores marítimos o vagones de tren. El haz de radiación puede ser producido por un radionucleido, como ^{137}Cs o ^{60}Co , o un generador de rayos X de alta energía, de 100 a 450 kV. Cada vez se usan más los aceleradores lineales con energías de 6 a 15 MeV, que pueden penetrar varios centímetros de acero y visualizar el contenido de cualquier contenedor. También se emplean haces de neutrones generados por un acelerador o una fuente de ^{252}Cf . La ventaja de los neutrones es que tienen la penetración necesaria e interactúan con la materia de una manera complementaria a los rayos X y pueden usarse para determinar la composición elemental de los productos en el interior de los contenedores.

PROSPECCIÓN ENERGÉTICA Y MINERA

Las sondas radiactivas se emplean como complemento para determinar las características de las rocas en sondeos de prospección geológica y testificación geofísica. Se pueden emplear sondas radiactivas basadas en la medida de los rayos gamma emitidos por los radionucleidos naturales (perfiles radiométricos), sondas de densidad que utilicen fuentes gamma y sondas neutrónicas que sirven para determinar la cantidad de agua existente en el terreno. Si este se encuentra satu-

rado, los registros de neutrones proporcionan una medida directa de su porosidad.

También se emplean trazadores radiactivos para el estudio de yacimientos petrolíferos y geotérmicos mediante inyección de los mismos. Por ejemplo, mediante la inyección y detección de un pulso de trazador (generalmente tritio) en un campo petrolífero se pueden deducir propiedades como su tamaño.

Durante el movimiento de materiales a granel mediante cintas transportadoras o de cangilones se puede medir la cantidad transportada empleando sondas gamma y su contenido de humedad, con sondas neutrónicas. Posteriormente, en el laboratorio, se emplean técnicas diversas para el análisis preciso de muestras.

APLICACIONES MEDIOAMBIENTALES

En el campo medioambiental, el empleo de trazadores radiactivos en cantidades muy pequeñas permite hacer un seguimiento de la distribución y comportamiento de los contaminantes en el medio ambiente. Además, la presencia global de algunos radionucleidos de origen artificial (^{137}Cs y otros liberados durante las pruebas atómicas en la atmósfera hasta 1964) ha permitido caracterizar el funcionamiento de muchos ecosistemas, dando impulso a la radioecología como ciencia.

En hidrología, las técnicas isotópicas –con isótopos naturales, como el ^3H o el ^{14}C , o artificiales como el ^{131}I –, ayudan al estudio y conservación de los recursos hídricos. Por ejemplo, para conocer la dinámica de lagos y embalses, filtración de represas, descargas de ríos, sedimentación y transporte de sedimentos. O el origen, edad, distribución, mecanismos de recarga de acuíferos, interconexiones entre ellos, etc. en el ámbito de las aguas subterráneas.

También se están empleando fuentes intensas de radiación, fundamentalmente aceleradores, en plantas de tratamiento de aguas residuales, para su esterilización, o en centrales térmicas de carbón, para reducir la emisión de contaminantes al formar radicales libres por ionización y provocar luego su recombinación en compuestos no contaminantes.

APLICACIONES AGROALIMENTARIAS⁸

Los isótopos y las radiaciones desempeñan un papel importante en la agricultura moderna. Ya en 1964 la FAO y el OIEA establecieron una comisión mixta para el empleo de isótopos y radiaciones en el desarrollo de la agricultura y la alimentación⁹, dentro de la cual se mantiene una incesante actividad en diversas áreas.

ERRADICACIÓN DE PLAGAS

La técnica de esterilización de insectos mediante irradiación puede ser útil en situaciones en las que estos han adquirido resistencia a los insecticidas químicos. La técnica consiste en exponer insectos machos criados en laboratorio, en una fase apropiada de su desarrollo, a dosis de radiación ionizante suficientes para esterilizarlos. Los machos se aparean con las hembras, pero sin producir descendencia. Tras repetidas liberaciones de machos esterilizados se reduce notablemente la plaga de insectos en un área determinada. Mediante esta técnica se han dominado plagas de insectos en países tropicales, tales como la mosca mediterránea de la fruta, la mosca del gusano barrenador del Nuevo Mundo, la mosca *tsé-tsé* o el mosquito de la malaria (*Anopheles*).

Para tener éxito deben realizarse, como primera medida, estudios ecológicos muy detallados. Deberá evaluarse el número aproximado de insectos, sus movimientos, hábitos, gama y distribución. Los estudios pueden durar meses, ya que es necesario marcar los insectos (normalmente mediante radisótopos como el ^{32}P o el ^{59}Fe) y atraparlos nuevamente.

ESTUDIOS DE FERTILIDAD DEL SUELO MEDIANTE TRAZADORES

Se emplean trazadores en el estudio de la fertilidad del suelo, optimizando la irrigación y el aprovechamiento de los abonos. Marcando los abonos con isótopos, tales como el ^{32}P ó el ^{15}N , se puede determinar la cantidad de abono que absorbe la planta y la que se pierde en el medio ambiente.

MEJORAS GENÉTICAS

Existen dos métodos principales para inducir artificialmente mutaciones en los cultivos: el empleo de agentes químicos y las técnicas de irradiación, siendo estas últimas más eficaces en ciertos genes vegetales, como los de algunos frutales. Mediante la mutación genética se pueden mejorar las siguientes propiedades: resistencia al encamado, adelanto o retraso de la maduración para evitar periodos de sequías, heladas o plagas, mejora de las características de las semillas (en particular su valor nutritivo), aumento de la resistencia a las enfermedades de los cultivos, mejora de las características agronómicas frente al frío o el calor o las condiciones adversas del suelo, mejora del rendimiento, con experiencias en alrededor de un centenar de variedades de cultivo en proporciones entre el 3% y el 10%, que en algunos casos han llegado hasta el 45%.

ZOOTECNIA Y PRODUCCIÓN ANIMAL

Los radioisótopos pueden desempeñar un papel importante en la estimación de las cantidades óptimas de alimentos y de agua que debe recibir el ganado. Asimismo,

mo, con el empleo de técnicas de radiación ionizante se han podido combatir algunas enfermedades corrientes. También se vienen utilizando modernas técnicas de radioinmunoanálisis para controlar las hormonas que determinan el régimen reproductivo del animal.

IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS PARA SU CONSERVACIÓN

Las grandes pérdidas de alimentos recolectados que tienen lugar anualmente en el mundo se deben, fundamentalmente, a que los productos alimentarios están infestados por insectos, gorgojos, hongos, etc., que producen su destrucción o putrefacción. Por otro lado, la carga patógena portada por los alimentos es la causa de múltiples infecciones entéricas. Todas estas pérdidas e intoxicaciones pueden paliarse mediante la irradiación de los alimentos dentro de un intervalo de dosis que sea suficiente para conseguir el efecto deseado (reducción de la carga microbiana), sin que dé lugar a la alteración de los caracteres organolépticos de los mismos. Dicha técnica está reconocida por organismos como la FAO, OMS y OIEA¹⁰.

La irradiación consiste en exponer los alimentos –envasados o a granel– a rayos gamma (habitualmente fuentes muy intensas de ⁶⁰Co o ¹³⁷Cs), rayos X o electrones durante un tiempo determinado. Procediendo de este modo, y para dosis inferiores a 10 kilograys, se ha comprobado reiteradamente que los alimentos son inocuos y tienen una mayor vida útil. Es importante señalar que la exposición de los alimentos a estas fuentes de radiación no induce radiactividad en los mismos, ni siquiera cuando se aplican dosis de radiación cien o mil veces más elevadas que la dosis necesaria para el tratamiento de los alimentos.

APLICACIONES DE LOS RADISÓTOPOS EN INVESTIGACIÓN

Las estructuras moleculares cristalinas pueden comportarse como redes de difracción de los rayos X, la luz sincrotrón o los neutrones fríos, por lo que el estudio de los diagramas de difracción de las sustancias puede informar acerca de sus estructuras cristalinas, así como de las disposiciones moleculares subyacentes. Así, se descubrieron las estructuras de moléculas complejas, como el propio ADN, o de las proteínas. También se usan para determinar los estados de tensiones internas en los materiales por la deformación que estas producen en la estructura cristalina.

Por su lado, los radioisótopos constituyen la herramienta por excelencia en todas las ocasiones en que sea necesario marcar una molécula cuyo destino final se tenga interés en conocer, sea en procesos físicos, químicos o biológicos. El empleo de los trazadores ha supuesto una gran revolución en el conocimiento del

medio ambiente, la fisiología humana, la biología celular y molecular y, en general, en todas las ciencias de la naturaleza.

Otra técnica analítica de gran potencial es la activación neutrónica, con la que se pueden detectar trazas de numerosos elementos químicos en las muestras analizadas. Se aplica con gran éxito en la investigación en agricultura, arqueología, ingeniería, geología, medicina, oceanografía, investigación forense y criminal, etc. Para aplicarla se necesitan fuentes intensas de neutrones, principalmente reactores experimentales; cuando un material se introduce en un campo de neutrones se producen reacciones de activación, que dejan a los núcleos en estado excitado; si el radioisótopo producido decae por emisión de fotones gamma, estos se pueden utilizar para identificar los componentes elementales del material.

En el estudio y conservación del patrimonio histórico y artístico, mediante radiografía o neutrografía se dispone de un método no destructivo insustituible de investigación de obras pictóricas, esculturas y objetos delicados (por ejemplo, las momias egipcias). La radioesterilización permite también luchar contra el deterioro de instrumentos musicales, pinturas, libros y documentos antiguos por causa de los agentes destructivos como hongos o larvas de insectos.

También se emplea mucho la técnica de datación de restos arqueológicos o paleontológicos mediante isótopos naturales. Entre los que destaca el ¹⁴C. El ¹⁴C, con un periodo de semidesintegración de 5.730 años, se forma en la atmósfera por acción de los rayos cósmicos y se integra en el ciclo global del carbono. Al morir, los seres vivos dejan de intercambiar carbono con el exterior, y el ¹⁴C en su interior se desintegra. La proporción existente de ¹⁴C al cabo del tiempo permite la datación. Por su parte, el ⁴⁰K (periodo 1.250 millones de años) permite la datación de minerales.

Por último, no podemos olvidar la investigación del espacio, ya que las sondas espaciales de gran alcance, con las que cada vez conocemos mejor el sistema solar, son capaces de recorrer esas distancias y mantener la comunicación con la Tierra gracias a los generadores de energía isotópicos (termoiónicos de ²³⁸Pu o ⁹⁰Sr) o nucleares (minireactores).

ENERGÍA NUCLEAR

Las múltiples aplicaciones pacíficas de la energía nuclear, en especial su utilización para la producción de energía eléctrica, también forman parte de nuestra vida cotidiana. A pesar de sus indudables beneficios, la sociedad, a todos sus niveles, muestra una preocupación inquisitiva por la seguridad de las centrales nucleares y de todas las actividades que guarden relación

con el uso de sustancias radiactivas. Si bien se reconoce que la energía nuclear entraña peligro, porque implica la generación y manipulación de productos radiactivos tóxicos, también hay que reconocer que una actividad peligrosa no tiene por qué ser insegura si se incorporan las medidas técnicas y administrativas adecuadas. En esto, la energía nuclear no es distinta de otras actividades peligrosas que la sociedad admite y utiliza, como el gas doméstico, la electricidad o el transporte.

En ese sentido, para conseguir una protección adecuada en el uso de la energía nuclear, con sus propiedades tecnológicas bien diferenciadas de otras aplicaciones de la radiación, es necesario establecer medidas técnicas y administrativas que garanticen la seguridad a fondo, y que constituyan el cuerpo de lo que se conoce como seguridad nuclear. Desde el punto de vista de la seguridad, el objetivo fundamental en el diseño de una central nuclear es asegurar que se mantienen confinados los productos radiactivos y las radiaciones que estos emiten, controlando escrupulosamente las cantidades vertidas al medio ambiente para mantenerlas dentro de lo aceptable.

La emisión de radiación al exterior se controla mediante la interposición de *blindajes* con el espesor suficiente para absorberla. Constituyen un buen blindaje el agua del reactor y de las piscinas donde se almacena el combustible gastado, el acero de los circuitos y contenedores de transporte para el combustible y el hormigón de los muros de los edificios, cuyo espesor se determina para que el nivel de radiación en el exterior sea completamente inocuo.

Para aislarlos del medio exterior, y por tanto evitar los daños que podrían causar, los productos radiactivos acumulados en las centrales nucleares se encierran en barreras, cuya integridad física, bajo cualquier circunstancia concebible, constituye el principal objeto

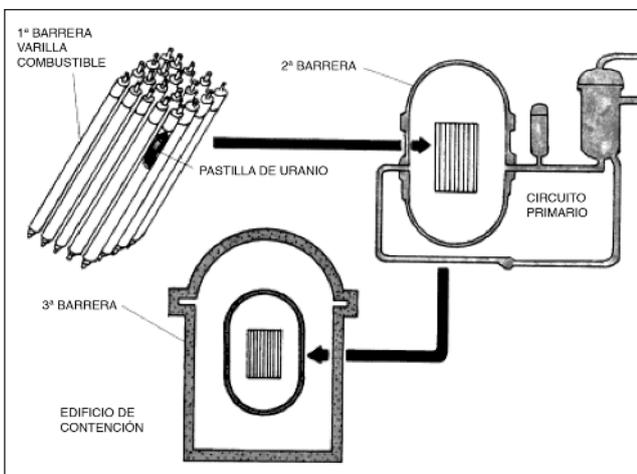


FIGURA 4. Ilustración del concepto de aislamiento de los productos radiactivos de las centrales nucleares mediante barreras múltiples.

vo de los diseños. En general, las *barreras de contención* son tres (Figura 4): las propias pastillas de combustible y las varillas donde se alojan, el circuito primario de refrigeración (barrera de presión) y la barrera de contención, como tercera barrera y última frente a los impactos que se tendrían que resistir en caso de accidente.

IMPACTO RADIOLÓGICO DE LAS FUENTES ARTIFICIALES DE RADIACIÓN IONIZANTE

A pesar de la multitud de aplicaciones que las radiaciones ionizantes tienen en el mundo contemporáneo, su impacto en términos de dosis es muy reducido, salvo en las exposiciones como pacientes. Las evaluaciones del UNSCEAR³ se resumen y comparan con las referidas a las fuentes naturales de radiación en la figura 5. En ellas se registra una cifra muy pequeña para el impacto sobre el público del uso de la energía nuclear, variable entre 0,0002 y 0,02 mSv/año^{**}. La lluvia radiactiva producida por los ensayos de armamento nuclear en la atmósfera durante los años 50 y 60 o el accidente de Chernóbil también suponen todavía una pequeña exposición de la población de todo el planeta, cifrada actualmente en

** Como comparación, un estudio muy reciente y detallado del Consejo de Seguridad Nuclear¹¹ para nuestro país indica que en el periodo 1975-2003, la población más expuesta de las zonas nucleares no superó 350 mSv en total (0,0125 mSv/año en promedio).

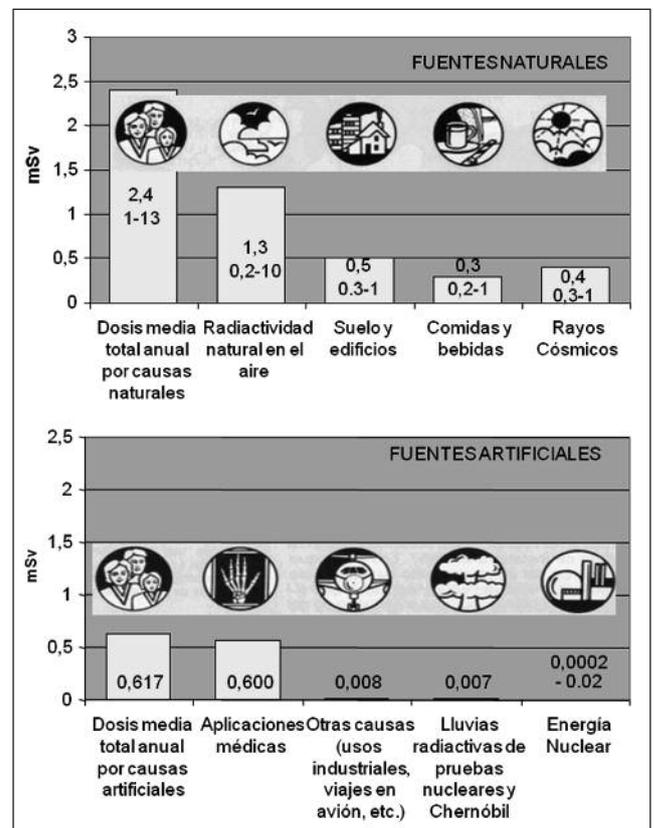


FIGURA 5. Contribución de las diferentes fuentes de radiación naturales y artificiales a la dosis media total anual recibida por la población mundial³.

unos pocos microsievverts al año (0,007 mSv). Por su parte, el conjunto de las demás fuentes de uso industrial, unido al incremento de dosis por la radiación cósmica recibida al viajar en avión, suponen 0,008 mSv/año en el promedio mundial. Frente a ello, las exposiciones médicas suponen 0,6 mSv/año como promedio.

LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA Y SUS PRINCIPIOS BÁSICOS

Conociendo los efectos que la radiación es capaz de producir sobre el ser humano, y por ende en el resto de seres vivos, es evidente la necesidad de controlar las actividades que impliquen el manejo o producción de sustancias radiactivas. Desde 1928 existe un organismo internacional de reconocido prestigio –la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)–, que se preocupa de emitir una serie de recomendaciones^{12,13}, basadas en los más recientes conocimientos científicos sobre los efectos de la radiación, para orientar a las autoridades encargadas en cada país de la regulación y control en materia de seguridad nuclear y protección radiológica. Sus recomendaciones se debaten y adaptan en forma de normativa por los organismos internacionales relevantes, incluida la Unión Europea, por lo que acaban incorporándose a la legislación española, siendo la norma principal en nuestro país el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes¹⁴.

La protección radiológica tiene un *doble objetivo fundamental*: evitar la aparición de los efectos deterministas sobre la salud (observables al poco tiempo de producirse la exposición a las radiaciones, y precisando de una dosis superior a los umbrales característicos de cada órgano o tejido) y limitar la probabilidad de incidencia de los efectos probabilistas (cánceres y defectos hereditarios que pudieran manifestarse incluso después de muchos años) hasta valores que se consideran aceptables. Pero, por otra parte, sin limitar indebidamente las prácticas que, dando lugar a exposición a las radiaciones, suponen un beneficio para la sociedad o sus individuos.

A los efectos de la protección radiológica se definen las *situaciones planificadas* como aquellas que pueden incrementar la exposición humana por introducir nuevas fuentes de radiación, vías de exposición o individuos expuestos, o por modificar las relaciones entre las fuentes ya existentes y el hombre. Para conseguir lograr el objetivo fundamental de la protección radiológica se establecen tres principios básicos¹²:

- a) **Justificación**: Cualquier decisión que altere las condiciones de exposición debe producir el suficiente beneficio a los individuos expuestos o a la sociedad como para compensar el detrimento por causa de la exposición a la radiación.
- b) **Optimización de la protección**: Para cualquier fuente de radiación, la magnitud de las dosis individua-

les, el número de personas expuestas, y la probabilidad de verse expuestas, deben mantenerse tan bajas como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta consideraciones sociales y económicas (ALARA, *As Low As Reasonably Achievable*).

- c) **Limitación de dosis y riesgos individuales**: En las situaciones de exposición planificada, la dosis total a cualquier individuo por el conjunto de fuentes susceptibles de control que le afecten, excepción hecha de su exposición como paciente, no deben superar los límites apropiados.

La justificación de una situación de exposición ha de analizarse teniendo en cuenta las ventajas e inconvenientes asociados a la introducción de la misma, estableciendo un balance adecuado entre ambos. Puesto que en la realidad hay componentes de beneficios y costes difícilmente cuantificables o de evaluación subjetiva, siempre es posible la comparación de diferentes alternativas. En todo caso, para cada práctica (por ejemplo, la generación de energía eléctrica) debe considerarse la suma de todos los procesos asociados a la misma, incluyendo explícitamente la generación y gestión de los residuos generados.

Una vez justificada una práctica, ha de procederse a su optimización. Puesto que se admite que toda dosis de radiación implica un riesgo no nulo, no es suficiente con cumplir los límites de dosis –que en todo caso limitan la región de lo inaceptable–, sino que han de reducirse las dosis hasta encontrar un valor óptimo que maximice el beneficio neto total, para lo cual, mediante técnicas apropiadas se puede comparar el esfuerzo necesario para aminorar las dosis frente a la reducción del detrimento sanitario obtenida.

Los límites que se aplican a las exposiciones debidas a situaciones planificadas, exceptuando la exposición al fondo radiactivo natural y la exposición médica, se recogen en la tabla 3, que incluye los límites de dosis aplicables a la exposición recibida en el trabajo o como consecuencia de él, incluyendo la producida en el trabajo a consecuencia de las fuentes naturales, cuando supere considerablemente los niveles ambientales en el entorno. También se muestran los límites establecidos para acotar la exposición de la población en general. Para cada instalación o fuente concreta han de aplicarse límites restringidos, que eviten con razonable prudencia la superación de estos límites por cualquier individuo, tomando como referencia aquellos que puedan estar más expuestos y que sirvan como confín superior de las dosis individuales admisibles en la optimización de dicha fuente (*restricciones de dosis*).

INFRAESTRUCTURA DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Para la correcta aplicación práctica de la protección radiológica es necesario que la sociedad se dote de una

TABLA 3. Límites de dosis para los trabajadores profesionalmente expuestos a radiaciones ionizantes y para los miembros del público¹⁴

TRABAJADORES PROFESIONALMENTE EXPUESTOS	
Tipo de exposición	Límites para la dosis anual
Dosis efectiva (suma de la dosis por exposición externa y la dosis comprometida a 50 años por incorporaciones durante el periodo)	100 mSv en 5 años (20 mSv promedio anual)
Cristalino	50 mSv máximo anual
Piel, manos, antebrazos, tobillos	150 mSv
Mujeres gestantes (dosis al feto)	500 mSv
	1 mSv total
MIEMBROS DEL PÚBLICO	
Tipo de exposición	Límites para la dosis anual
Dosis efectiva	1 mSv
Cristalino	15 mSv
Piel	50 mSv

serie de medios, coordinados por un organismo regulador responsable, que en el caso de España es el Consejo de Seguridad Nuclear. Entre otros elementos cabe citar el sistema de licenciamiento y autorización de todas las prácticas que conlleven exposición a radiaciones ionizantes, la inspección y control del funcionamiento de las prácticas por parte del organismo regulador, el control de las fuentes y materiales radiactivos, la protección de los trabajadores, de los pacientes, el personal profesionalmente expuesto, el público y el medio ambiente, así como la gestión de los residuos radiactivos. En nuestro país, la mayor parte de esos elementos se recogen en el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas¹⁵.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

A modo de resumen de lo presentado se puede afirmar lo siguiente:

- El principal efecto causado en la materia por las radiaciones emitidas por las sustancias radiactivas es la ionización.
- El entorno humano presenta niveles significativos de radiaciones ionizantes de forma natural.
- Las radiaciones ionizantes y la radiactividad se emplean de forma insustituible en múltiples campos, habiendo proporcionado grandes beneficios a la humanidad en terrenos como la medicina, las aplicaciones industriales, la seguridad, la minería y la prospección energética, aplicaciones agroalimentarias, el estudio del medio ambiente y la lucha contra la contaminación, la investigación en biología, arte, etc.
- La energía nuclear requiere disponer de barreras de aislamiento para los productos radiactivos que acumulan el combustible nuclear y los residuos generados, así como de sistemas de específicos de seguridad frente a accidentes.

- El uso de la tecnología nuclear en distintos campos supone, en promedio, un modesto incremento de los niveles naturales de radiaciones ionizantes.
- El objetivo principal del sistema de protección radiológica es asegurar que no se adopte ninguna exposición planificada a menos que su introducción produzca un beneficio neto y positivo, que todas las exposiciones necesarias se mantengan tan bajas como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales, y que las dosis recibidas por los individuos no excedan ciertos límites establecidos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre, por el que se establecen las unidades legales de medida. BOE núm. 18, de 21 de enero.
2. Luque S, et al, Programas de vigilancia radiológica ambiental. Resultados 2007. Colección. Informes Técnicos 21.2008. Consejo de Seguridad Nuclear. Madrid, 2008.
3. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and Effects of Ionising Radiation, UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York: United Nations; 2010. Disponible en: http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_GA_Report.pdf.
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and Effects of Ionising Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York: United Nations; 2000. Disponible en: <http://www.unscear.org/docs/reports/gareport.pdf>
5. Vañó E. La utilización de los isótopos radiactivos y las radiaciones ionizantes en medicina. Actas de la jornada Las radiaciones ionizantes y nuestros genes. Zaragoza: Fundación Genes y Gentes; 2003. Disponible en: <http://www.fundaciongenesygentes.es>.
6. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Ionizing Radiation Exposure of the Po-

- pulation of the United States. NCRP Report No. 160 Bethesda; 2009.
7. Borrás C. La necesidad de reglamentar el uso de los sistemas de inspección personal y de carga que utilizan radiaciones ionizantes. Madrid: Sociedad Española de Protección Radiológica; 2010.
 8. Baró, J. y otros. Origen y gestión de residuos radiactivos. Madrid: Ilustre Colegio Oficial de Físicos. 3ª edición; 2000.
 9. Joint FAO/IAEA Programme. Dosimetry for Food Irradiation. Technical Report Series No. 409 SIT/DOC/010/409, Vienna: IAEA; 2002.
 10. Facts about Food Irradiation A series of Fact Sheets from the International Consultative Group on Food Irradiation (ICGFI); 2000. Disponible en <http://www.iaea.org/nafa/d5/public/foodirradiation.pdf>
 11. Consejo de Seguridad Nuclear e Instituto de Salud Carlos III. Estudio epidemiológico del posible efecto de las radiaciones ionizantes derivadas del funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible nuclear españolas sobre la salud de la población que reside en su proximidad. Madrid; 2010. Disponible en: http://www.csn.es/images/stories/publicaciones/novedades/3_informe_final.pdf.
 12. International Commission on Radiological Protection (ICRP). 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford (1991) [Traducción al español por la Sociedad Española de Protección Radiológica. Madrid; 1995].
 13. International Commission on Radiological Protection (ICRP). 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP Publication 103 (Users Edition). Annals of the ICRP 2007:37:2-4, [Traducción al español por la Sociedad Española de Protección Radiológica. Madrid; 2008].
 14. Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. BOE núm. 178. de 26 julio 2001.
 15. Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas. BOE núm. 313. de 31 diciembre 1999).