

RADIACIONES IONIZANTES, EFECTOS Y REGLAMENTACIÓN

1.- INTRODUCCION

La radiación ionizante, por su propia naturaleza, produce daños en los seres vivos. Desde el descubrimiento de los rayos X por Roentgen en 1895 y de la radiactividad por Becquerel, en 1896, los conocimientos sobre sus efectos han ido avanzando a la par que los estudios sobre las propias radiaciones y sobre la esencia de la materia misma, no siempre sin episodios desgraciados.

El propio Becquerel (Fig. 1) sufrió daños en la piel causados por la radiación de un frasco de radio que guardó en su bolsillo. Marie Curie (Fig. 1), merecedora en dos ocasiones del Premio Nobel por sus investigaciones sobre las propiedades de las sustancias radiactivas, falleció víctima de leucemia, sin duda a causa de su exposición a la radiación. Más de trescientos de los primeros trabajadores en este campo murieron a causa de las dosis recibidas, con casos significativos como el de los pintores que dibujaban con sales de radio los números en las esferas luminosas de los relojes y mirillas de cañones, afinando el pincel con la boca, que en su mayoría desarrollaron cáncer de mandíbula. El empleo de la bomba atómica en Hiroshima y Nagasaki produjo la irradiación de las poblaciones supervivientes a la explosión, con secuelas que aún continúan siendo estudiadas y son fuente de valiosa información acerca de los efectos biológicos producidos por la radiación a largo plazo. La utilización de las radiaciones en medicina, con fines terapéuticos o de diagnóstico, constituye sin duda uno de los aspectos más destacados del beneficio que éstas suponen para la Humanidad, pero en su desarrollo también se causaron exposiciones a los pacientes, que en la actualidad serían injustificables, provocando en ciertos casos el desarrollo de daños atribuibles a la radiación recibida.



Figura 1.- Henry Becquerel y Marie Curie.

Toda esa experiencia negativa sin duda ha ido creando en el subconsciente colectivo una idea deformada sobre la radiación y la radiactividad, que se perciben como intrínsecamente peligrosas, con independencia del tipo de radiación, de la cantidad recibida o del motivo por el que se reciba. Además, a nivel popular, suele desconocerse que radiación y radiactividad forman parte de la Naturaleza y de nuestro propio cuerpo, siendo vistas en general como un nefasto invento del Hombre.

Sin embargo, la radiactividad es uno de los grandes descubrimientos del hombre contemporáneo, y 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.

Esta lección presenta la naturaleza de la radiación ionizante y los efectos que causa sobre la materia y en particular los tejidos vivos, los procedimientos para su detección y medida, así como las diferentes fuentes de radiación, naturales y artificiales, a las que los seres humanos estamos expuestos. A consecuencia de todo ello es necesario protegerse adecuadamente, para evitar sufrir daños, pero sin limitar innecesariamente la utilización beneficiosa que se puede hacer de la radiación y las sustancias radiactivas en numerosos ámbitos. Ese es el objetivo de la Protección Radiológica, cuyos principios y métodos serán también revisados a lo largo de la lección.

2.- LA 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 les 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, 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 (véase figura 2).

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 desintegran por unidad de tiempo, teniendo como unidad natural (1 desintegración / segundo) al Becquerel, así llamado en honor al descubridor de la radiactividad. Una unidad anteriormente utilizada, pero que no pertenece al Sistema Internacional, es el Curie, correspondiente a la actividad existente en un gramo de ^{226}Ra ($3,7 \cdot 10^{10}$ desintegraciones / segundo). El Becquerel (abreviadamente 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 Becquerel de ^{40}K , por lo que siempre se emplean sus múltiplos. Por el contrario 1 Curie (Ci) es una actividad considerable, e incluso peligrosa según las sustancias, por lo que se emplean a menudo sus submúltiplos. Para sustancias radiactivas cuya concentración sea inferior a 100 Bq/g o sustancias naturales sólidas de menos de 500 Bq/g, la

reglamentación vigente no exige ningún tipo de declaración o autorización (ref. 6), al considerarse prácticamente inocuas.

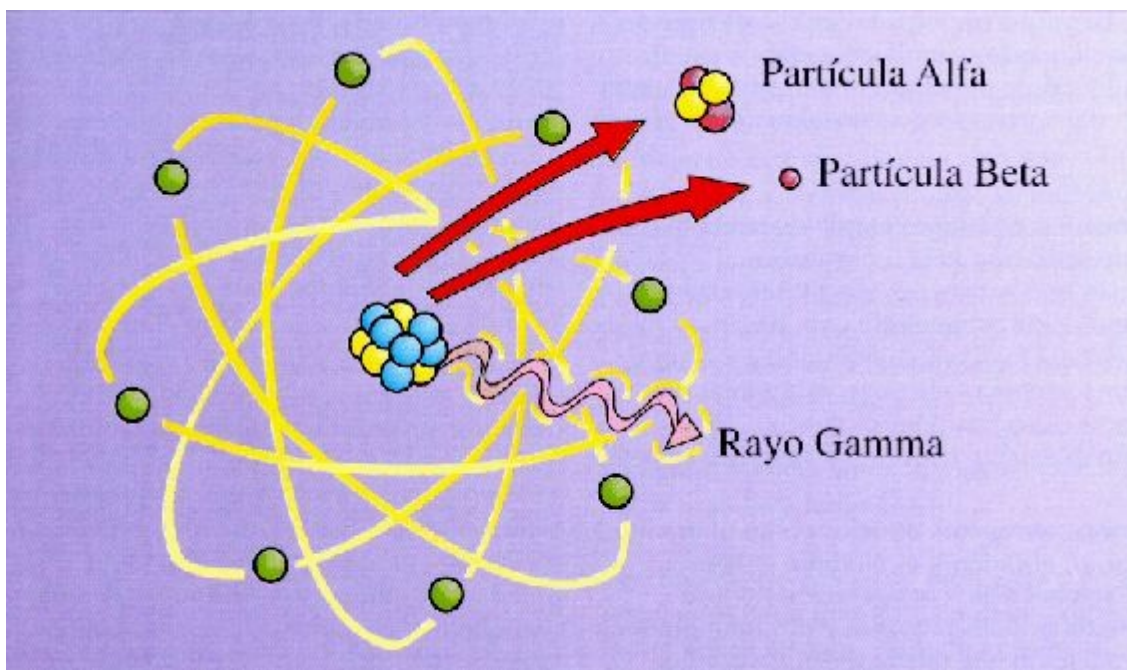


Figura 2.- Emisión de radiaciones ionizantes desde el núcleo atómico.

2.1. Interacción de la radiación con la materia.

A su paso por la materia, la radiación sufre distintos tipos de interacción, según su naturaleza. Si bien el tratamiento detallado de las interacciones entre las radiaciones y los medios materiales es un tema de extrema complejidad, para partículas cargadas (α y β) puede afirmarse que 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. En el primero, los electrones corticales son impulsados a un nivel superior, volviendo posteriormente al estado inicial tras emitir fotones luminosos. En el segundo, los electrones son expulsados del átomo o molécula, según se ilustra en la figura 3.

Las partículas pesadas (α y protones fundamentalmente) experimentan un frenado dependiente de su carga y su velocidad. La cesión de energía y la ionización producida en el medio no son constantes a lo largo de su trayectoria, resultando mayores cuanto más lenta vaya la partícula. A la vez, el alcance en cualquier medio material será muy limitado, de unos centímetros en el aire, o sólo unas micras en el tejido, no pudiendo atravesar la piel. Sin embargo, esta combinación de una alta densidad de producción de iones y corto alcance confiere a los radionucleidos emisores α una gran peligrosidad intrínseca en el caso de ser ingeridos o inhalados, ya que el daño celular resultante será muy intenso. Para los

electrones, el alcance aumenta a unos metros en aire, y al espesor de la piel en el cuerpo humano, no pudiendo sobrepasar el tejido subcutáneo.

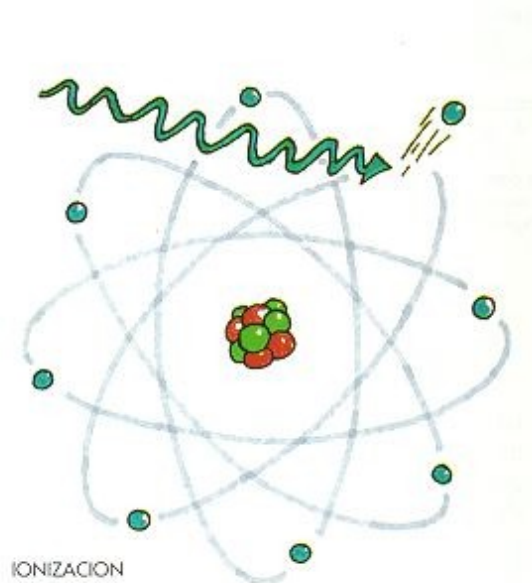


Figura 3.- Esquema de un proceso de ionización.

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 se desarrollarán posteriormente las interacciones comentadas anteriormente. El efecto fotoeléctrico supone la absorción de toda la energía del fotón por el átomo. Esa energía es transferida a un electrón cortical, que resulta expulsado del átomo. El efecto Compton puede interpretarse como una colisión elástica del fotón incidente con un electrón, en la que una parte de la energía del fotón será transferida al electrón como energía cinética, saliendo el fotón en distinta dirección a la inicial, con menor energía y frecuencia (mayor longitud de onda). Este efecto es más probable para energías intermedias de los fotones (entre 0,5 y 10 MeV aproximadamente), disminuyendo el rango de energías al aumentar el número atómico del absorbente. Por último, el proceso de formación de pares electrón-positrón consiste en la materialización de parte de la energía de un fotón en un par de partículas (electrón-positrón) que se reparten la energía sobrante; es un proceso que solamente puede producirse dentro del campo eléctrico del núcleo atómico y para energías superiores a 1,022 MeV. El alcance de la radiación y 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 posibles (de dispersión elástica, de dispersión inelástica, de captura radiactiva, de transmutación o de 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 (véase la Fig. 4 que compara la capacidad de penetración de los distintos tipos de radiación).

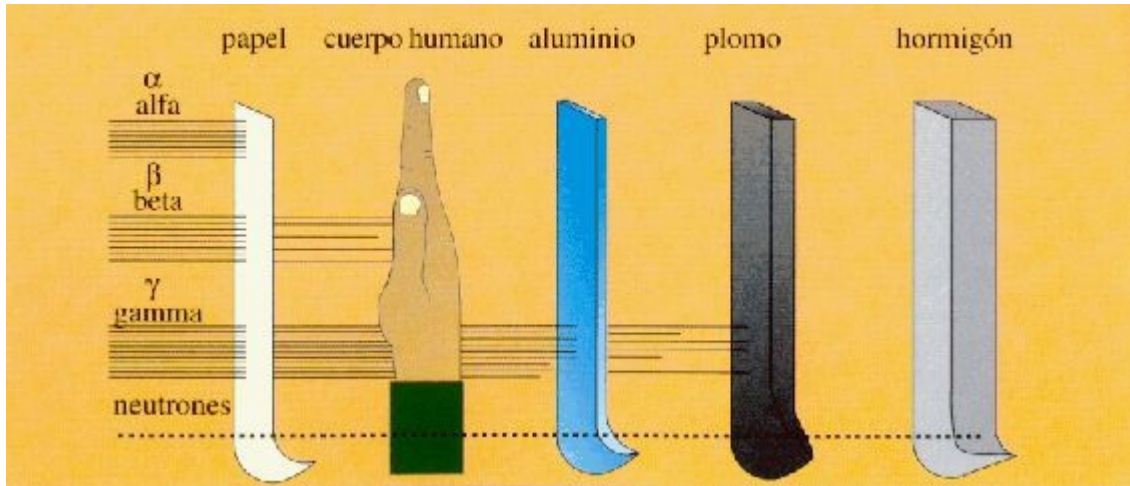


Figura 4.- Capacidad de penetración de los distintos tipos de radiación en la materia.

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, generalmente en proporción inversa al cuadrado de la distancia;
- 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. Generalmente este último factor de atenuación suele tomar forma exponencial negativa con la distancia recorrida.

De acuerdo con lo anterior, para el manejo seguro de fuentes emisoras de radiación ionizante, habrá que jugar con la distancia a las que éstas se sitúen y con los materiales que proporcionen un blindaje adecuado, al facilitar la interacción y la cesión de la energía de la radiación en los mismos. De tal manera que distancia, blindaje y tiempo constituyen los tres puntos clave del manejo seguro de fuentes radiactivas (Fig. 5).

A mayor distancia, menor exposición y dosis

Un blindaje adecuado permite acortar la distancia y reducir la dosis

¡No debe malgastarse el tiempo de exposición! La dosis es siempre proporcional a él

2.2 Detección y medida de la radiación ionizante

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. Su complejidad va, desde el conocido contador Geiger portátil hasta cámaras de

destellos o de burbujas (Fig. 6a) con el tamaño de una habitación, empleadas por los físicos de altas energías.

Puesto que el efecto principal causado por las radiaciones es la ionización, uno de los primeros detectores que se empleó en física nuclear fue la cámara de ionización (Fig. 6b), que está formada esencialmente por un recipiente cerrado que contiene un gas y dos electrodos con potenciales eléctricos diferentes. De los detectores basados en la ionización gaseosa, uno de los más versátiles y utilizados es el contador de Geiger-Müller, desarrollado en 1928 (Fig. 6b). En él, el tubo detector está lleno de un gas o mezcla de gases a baja presión. Los electrodos son la delgada pared metálica del tubo y un alambre fino de wolframio situado longitudinalmente en su eje. Un fuerte campo eléctrico establecido entre los electrodos acelera los iones producidos por la radiación, que colisionan con átomos del gas liberando electrones y produciendo más iones. Si la tensión entre los electrodos se hace suficientemente grande, la corriente cada vez mayor producida por una única partícula desencadena una descarga a través del contador. El pulso causado por cada partícula se amplifica electrónicamente y hace funcionar un altavoz o un contador mecánico o electrónico.

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 (diferentes sustancias orgánicas e inorgánicas, como plástico, sulfuro de cinc, yoduro de sodio o antraceno). La ionización produce destellos de luz visible que son captados por un tubo fotomultiplicador, un tipo de célula fotoeléctrica, 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.

Igualmente resultan de gran sensibilidad los detectores de semiconductores (generalmente germanio intrínseco o combinado con litio), en los que los pares electrón-hueco formados por la ionización aumentan momentáneamente la conducción eléctrica, lo que permite detectar estas partículas.

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.

a)



b)

Figura 6.- a) Cámara de burbujas que permite visualizar las trayectorias de las partículas cargadas desviadas por un campo magnético, con una trayectoria dependiente de su carga, masa y velocidad. b) Otros sistemas de detección habituales para protección radiológica: Cámara de ionización. Detector Geiger. Monitor de contaminación, de centelleo. Dosímetro personal de película fotográfica.

Para contabilizar la cantidad de radiación recibida por una persona (la dosis) también se emplean emulsiones dosimétricas, más gruesas y menos sensibles a la luz visible que las empleadas en fotografía, en las que los granos de plata ionizados adquieren un color negro cuando se revela la emulsión, pudiendo establecerse una relación directa entre el ennegrecimiento y la cantidad de radiación recibida. Otros dosímetros se basan en el empleo de materiales plásticos termoluminiscentes, en los que se libera luz visible al ser calentados, mediante un proceso que implica dos pasos: 1) la ionización inicial hace que los electrones de los átomos del material se exciten y salten de las órbitas internas de los átomos a las externas; 2) cuando se calienta el material y los electrones vuelven a su estado original, se emite un fotón de luz, que puede ser amplificado y medido al igual que se hacía 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. En el caso de los neutrones térmicos, se producen partículas alfa, detectables con facilidad, al colisionar con los núcleos de boro del trifluoruro de boro.

3.- EFECTOS BIOLÓGICOS CAUSADOS POR LA RADIACION IONIZANTE. DOSIS DE RADIACION.

3.1. Absorción de radiación y daño celular.

La absorción de la radiación por la materia viva es función tanto de la calidad y cantidad del haz de radiación como de la estructura y composición del tejido absorbente. Cabría distinguir varios casos en función del tipo de radiación (partículas cargadas α o β , fotones γ o rayos X, neutrones), no obstante, todas ellas acaban depositando su energía en el medio, directa o indirectamente, mediante los dos procesos ya comentados: ionización y excitación. Aunque la excitación de átomos y moléculas, en caso de que su energía supere la de los enlaces atómicos, puede causar cambios moleculares, el proceso de ionización resulta cualitativamente mucho más importante, puesto que necesariamente produce cambios en los átomos, al menos de forma transitoria y, en consecuencia, puede provocar alteraciones en la estructura de las moléculas a las que éstos pertenezcan.

La importancia de la ionización inducida en los tejidos vivos por una radiación, se cuantifica mediante un concepto de amplia utilización en radiobiología: la transferencia lineal de energía (TLE, o LET en abreviatura inglesa) o la cantidad de energía cedida por unidad de recorrido de la radiación en el tejido. La TLE depende del tipo de radiación (masa, carga y energía de las partículas) así como del medio absorbente. En general, de forma simplificada, pero útil, se suelen clasificar las radiaciones en dos categorías: de baja y de alta TLE; a la primera pertenecerían los electrones (radiación β) y la radiación X o γ , mientras que la radiación α y los neutrones, se consideran de la segunda. A

mayor TLE de una radiación, mayor concentración en la energía transferida al medio y mayor localización de las moléculas modificadas por la ionización.

Si las moléculas afectadas están en una célula viva, la propia célula puede verse dañada, bien directamente si la molécula resulta crítica para la función celular, o indirectamente al provocar cambios químicos en las moléculas adyacentes, como por ejemplo mediante la formación de radicales libres. El daño celular es particularmente importante si la radiación afecta a las moléculas portadoras del código genético (ácido desoxirribonucleico, ADN) o de la información para sintetizar las proteínas (ácido ribonucleico mensajero). Estos daños pueden llegar a impedir la supervivencia o reproducción de las células, aunque frecuentemente sean reparados por éstas. No obstante, si la reparación no es perfecta, pueden resultar células viables pero modificadas. El proceso descrito aparece representado en la figura 7.

Figura 7.– Representación de los efectos de la radiación ionizante sobre los tejidos vivos.

La aparición y proliferación de células modificadas puede verse influenciada por un buen número de otras causas (agentes cancerígenos o mutágenos) aparte de la radiación, que pueden actuar antes o después de la exposición a la misma. Por ello, el peligro de la radiación no es la producción de mutaciones en si, sino

que ésta pueda inducir un número de éstas superior al espontáneo que se produce en todo ser vivo, provocando una situación cuyas condiciones el organismo no sea capaz de superar.

Estudios de laboratorio, mediante la irradiación celular in vitro, permiten afirmar que la cantidad de mutaciones es mayor cuanto mayor es la dosis de radiación aplicada, no existiendo umbral de dosis por debajo del cual no puedan producirse mutaciones, observándose, para una misma dosis, una mayor cantidad de mutaciones cuanto mayor TLE posea la radiación.

3.2 Efectos somáticos agudos.

Si un número suficientemente grande de células de un mismo órgano o tejido mueren o resultan drásticamente modificadas, puede haber una pérdida de la función del órgano, tanto más seria cuanto mayor sea el número de células afectadas, constituyendo un daño somático que se manifestará al poco tiempo de la irradiación. Para que este tipo de daños se manifiesten, en general habrán de superarse unas dosis mínimas o "umbrales" para la manifestación de efectos clínicos. A pesar de que los cambios celulares iniciales son aleatorios, el gran número de células que han de verse afectadas para que se inicie un efecto clínicamente observable, confieren a este tipo de daños un carácter determinista por encima de los umbrales de dosis correspondientes. Una vez superados estos umbrales, la probabilidad de que la radiación produzca el daño en un individuo sano, crece con cierta rapidez hasta la unidad. Por supuesto, si la dosis es suficientemente grande, puede conducir a la muerte de la persona irradiada

No obstante, la reacción después de una irradiación varía mucho entre las distintas partes del organismo, y depende también del tratamiento médico que pueda suministrarse al paciente y de si la dosis se recibe de una sola vez o en varias etapas. En general, los órganos pueden reparar hasta cierto punto los daños provocados por la radiación, de forma que una misma dosis suministrada de forma paulatina es mejor tolerada que si se recibe de forma instantánea.

3.3 Cánceres y daños hereditarios (efectos latentes).

El ser humano sufre muchos millones de ionizaciones en su masa de ADN cada día por causa de las fuentes naturales de radiación. Sin embargo, el cáncer no produce más de una de cada cuatro muertes, y sólo una pequeña fracción de éstas es atribuible a la radiación. Se puede afirmar, por tanto, que el proceso que conduce desde la creación de un par iónico en la molécula del ADN hasta la aparición de un cáncer es altamente improbable.

Por otra parte, alrededor del diez por ciento de los recién nacidos sufre algún tipo de defecto hereditario, desde ligeras afecciones, como el daltonismo, hasta graves incapacidades, como el síndrome de Down. Los efectos genéticos pueden clasificarse en dos categorías: alteraciones en el número y la estructura de los cromosomas, y mutaciones de los genes. Las mutaciones genéticas se clasifican, a su vez, en dominantes (que aparecen en los hijos de quienes las

padecen) y recesivas (que sólo aparecen cuando ambos progenitores poseen el mismo gen mutante).

A pesar de las numerosas investigaciones llevadas a cabo en las últimas décadas, la información relativa al cáncer o a los defectos hereditarios inducidos por la radiación a bajas dosis es todavía escasamente significativa, siendo ésta una cuestión todavía abierta a la discusión científica (véase la Fig. 8). Para realizar estimaciones válidas del riesgo, deben reunirse ciertas condiciones: en primer lugar, debe conocerse con exactitud la dosis de radiación absorbida por todo el cuerpo o en los órganos de interés; la población irradiada ha de ser observada durante décadas a fin de que todos los tipos de daño tengan tiempo de aparecer; y, puesto que también se presentan naturalmente por múltiples causas, se deberá disponer de una población de referencia, pero que no haya sufrido la irradiación, a fin de poder saber casos habrían aparecido en ausencia de ésta. Tales estudios incluyen a los supervivientes de las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki, y a diversos grupos que sufrieron irradiaciones con fines médicos.

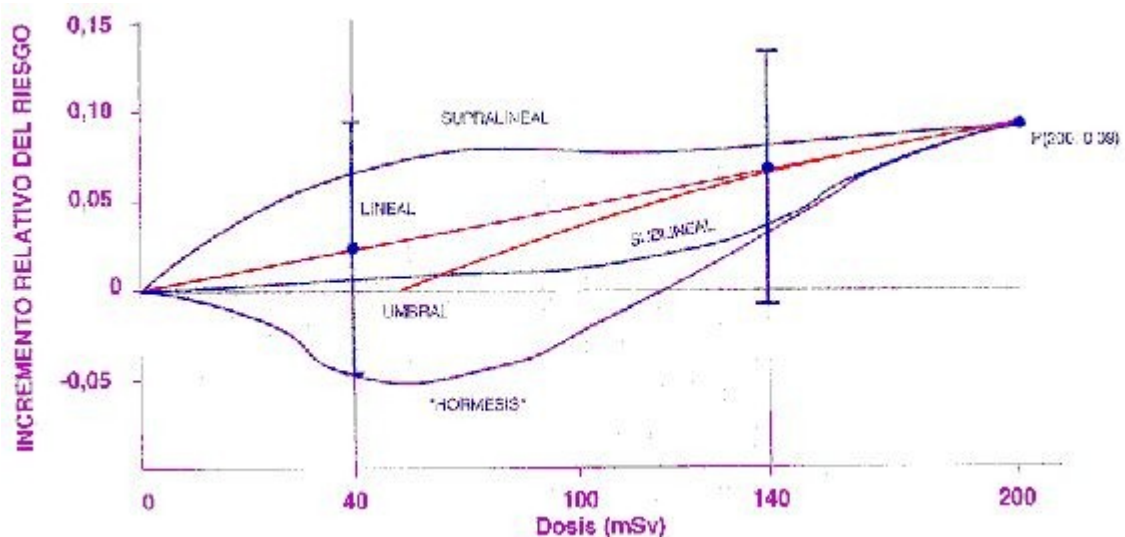


Figura 8.- Relación entre el incremento relativo del riesgo y la dosis. Un problema significativo de la protección radiológica reside en saber con certidumbre suficiente qué relación existe, para dosis bajas, entre el incremento relativo del riesgo, con respecto al natural, de contraer cáncer que experimenta un individuo y la dosis por él recibida. En la gráfica, sin tener valor cuantitativo, se incluyen las cinco hipótesis que han ido surgiendo a lo largo del tiempo y aún se consideran en la actualidad. De entre ellas, la que más se presta y más atención ha recibido desde el lado cuantitativo es la aproximación lineal. En la gráfica, deducida de datos de UNSCEAR94 y basada en análisis de supervivientes japoneses, se da por supuesto que se

conoce con suficiente certeza el punto P de la representación - en realidad no es así - en el que se supone que el riesgo natural aumenta en el 9% cuando la dosis recibida es de 200 mSv, lo que corresponde a un incremento relativo del riesgo de 4.5×10^{-4} por mSv. La Comisión Internacional de Protección Radiológica y la mayor parte de las instituciones nacionales consideran que la extrapolación lineal es una hipótesis aceptable, sin que lo avale la observación de la realidad. Las incertidumbres asociadas a los datos disponibles, representados

en la figura por una vez la desviación típica, justifican cualquiera de las hipótesis representadas. Nuevos proyectos de investigación actualmente en curso tratarán de aportar datos a tal cuestión. (reproducido de la ref. 13).

El principal problema reside en que los grupos de población de los estudios que han resultado concluyentes recibieron dosis de radiación significativamente superiores a las habituales en el campo profesional, o en la vida cotidiana. Por ello, no queda más alternativa que extrapolar los riesgos conocidos, producidos por dosis altas, al campo de las dosis reducidas. Prudentemente, los organismos internacionales expertos en el tema¹ suponen la inexistencia de umbral para la aparición de cánceres o de efectos hereditarios, y además que existe un incremento lineal constante del riesgo con el aumento de las dosis recibidas.

Para ofrecer estimaciones que puedan ser de aplicación general, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ref. 2) indica unos factores de riesgo promediados, que indican una probabilidad de muerte por cáncer del orden de 5×10^{-2} por cada Sievert (dosis efectiva) en una población de todas las edades, siempre que la exposición recibida sea pequeña. Con respecto a los daños hereditarios graves, en la primera generación después de la población que sufra la irradiación, la probabilidad es del orden de $1,5$ a 4×10^{-3} por cada Gray recibido en las gónadas. Si esta probabilidad se integra para todas las generaciones posteriores a la irradiada, el valor resultante es del 1 por ciento por Gray. El concepto de dosis de radiación y sus unidades se explica seguidamente.

4.- 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 las magnitudes apropiadas según se resume en la tabla I.

En ella se observa que 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 y el Sievert, resultan ser muy elevadas para su utilización práctica, por lo que se emplean mucho más sus submúltiplos el miliGray y el miliSievert, 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 equivalente recibida por cada órgano, según el riesgo asociado a su irradiación. Con ello, éste 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.

¹ La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), o el Comité Científico de las

Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR).

TABLA I
LA DOSIS DE RADIACIÓN Y SUS UNIDADES DE MEDIDA (*)

MAGNITUD	DEFINICION	UNIDADES
DOSIS ABSORBIDA D	Cociente entre la energía media (dE) cedida por la radiación a la materia en un elemento de volumen, y la masa (dm) del mismo.	Unidad del S.I.: Gray (Gy). 1 Gy = 1 Julio/kg Unidad histórica: rad. 1 rad = 0.01 Gy
DOSIS EQUIVALENTE H	Es una ponderación de la Dosis Absorbida, para tener en cuenta el tipo de radiación, de acuerdo con su potencialidad para producir efectos biológicos. $H = D \cdot w_R$, w_R - Factor de ponderación de la radiación.	Unidad del S.I.: Sievert (Sv). 1 Sv = 1 julio/kg Unidad histórica: rem. 1 rem = 0.01 Sv <i>Valores de w_R:</i> 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 medias recibidas por los distintos tejidos y órganos del cuerpo humano. $E = \sum_T w_T \cdot H_T$ <i>Los factores w_T son representativos del detrimento, o contribución al riesgo total de daños biológicos, que supone la irradiación de cada órgano individual.</i>	Sievert (Sv). <i>Valores de w_T:</i> 0,01 Sup.Huesos, Piel 0,05 Bazo, Mama, Hígado Esófago, Tiroides RESTO 0,12 Colon, Pulmón, Médula Roja, Estómago 0,20 Gónadas
COMPROMISO DE DOSIS (DOSIS COMPROMETIDA)	Tras una ingestión o inhalación de material radiactivo, dependiendo de su metabolismo, éste puede permanecer en el organismo durante mucho tiempo. Se denomina compromiso de dosis, o <i>dosis comprometida</i> , a la dosis acumulada por dicha causa durante un cierto periodo de tiempo (habitualmente 50 años).	
DOSIS COLECTIVA	Es 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. Se expresa en Sievert x persona	

(*) Conforme a las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ref. 2) y a la Directiva Europea 96/29 (ref. 7).

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.

Se pueden indicar valores de referencia que ayuden a comprender mejor la trascendencia de un determinado valor de dosis, lo que se presenta en la tabla II. Se observa que, frente a la dosis que podría suponer efectos letales de recibirse de forma rápida, la dosis recibida al año por término medio entre la población de España, sumando todas las contribuciones naturales y artificiales está a una distancia inferior en más de mil veces. El origen de esta exposición continuada a las radiaciones ionizantes se comenta seguidamente.

TABLA II
DOSIS DE RADIACION. VALORES COMPARATIVOS

Dosis (mSv)	Efectos sobre la salud o valor típico
10.000	Muerte en días o semanas (100% de los casos)
4.000	Muerte en días o semanas (50% de los casos)
250	No produce efectos observables de tipo inmediato
100	No hay evidencia de efectos sanitarios en seres humanos
3,5	Dosis media anual por persona en España
2,5	Dosis media anual por persona en el mundo
3,0	Una exploración radiográfica de aparato digestivo Un escáner (tomografía axial computerizada, TAC) de la cabeza
0,02	Una radiografía de tórax
0,002	3 horas en avión. Dosis anual media debida a la industria nuclear

La tabla muestra algunos valores característicos medios de la dosis de radiación. Para dosis equivalente a todo el cuerpo del orden de 10.000 miliSievert (mSv), las probabilidades de supervivencia son mínimas. Cuando la dosis baja a 4.000 mSv, recibiendo tratamiento médico adecuado la probabilidad de supervivencia aumenta al 50% por término medio. Dosis inferiores a 250 mSv no producirían efectos observables de tipo inmediato en la persona, salvo alguna variación temporal en los recuentos de células sanguíneas (leucocitos). Por debajo de los 100 mSv no existe evidencia concluyente de efectos sanitarios en seres humanos, ya que los colectivos que presentan mejores características para los estudios epidemiológicos recibieron dosis más elevadas. Por debajo de estas cifras resulta muy difícil establecer relaciones causa-efecto entre la dosis recibida y la aparición de cánceres o defectos hereditarios, ya que la radiación no es sino uno más entre muchos factores causantes a los que el ser humano está expuesto. Cifras características de la dosis media anual en España y en el mundo serían 3,5 y 2,5 mSv respectivamente, residiendo la diferencia en el uso médico que de las radiaciones se hace en los países desarrollados frente al promedio mundial. Una exploración radiográfica de aparato digestivo o un escáner de cabeza pueden suponer en media una dosis de 3 mSv, mientras que una simple radiografía de tórax supone 0,02 mSv. Frente a estos valores, la dosis media anual recibida por la población española por causa de la industria nuclear es del orden de 0,001 a 0,002 mSv, que resultan equivalentes, por ejemplo, a la dosis que la radiación cósmica produce cuando se realiza un vuelo de 3 horas en un avión comercial.

5.- FUENTES DE RADIACIÓN IONIZANTE NATURALES Y ARTIFICIALES². _

La presencia de la radiación ionizante es una constante en nuestro mundo y en el Universo. Entre las fuentes de radiación naturales, el espacio exterior y el propio Sol se encuentran en el origen de la llamada “radiación cósmica” (Fig.

9), de la cual llegan a la Tierra cada segundo del orden de 2×10^{18} partículas de muy elevada energía, fundamentalmente protones (86%), y partículas α (12%)

(ref. 5). La atmósfera terrestre nos protege de esa radiación, que en buena parte es frenada y absorbida en ella, de manera que al nivel del mar se recibe una dosis mucho menor de la que se tiene en zonas montañosas o de la que se recibe al

viajar en avión. Así, a 10 kilómetros de altitud se reciben en promedio 5 miliSievert al año, mientras que a 600 metros solamente 0,03. Al tratarse en su

mayoría de partículas con carga eléctrica, son desviadas por el campo magnético terrestre, y en la zona ecuatorial la dosis es menor que en los polos terrestres.

Una persona habitante de España, en promedio, cada hora es atravesada por

100.000 rayos cósmicos de neutrones y 400.000 rayos cósmicos secundarios. Esta radiación, al reaccionar con los constituyentes de la atmósfera produce distintas sustancias radiactivas como el ^{39}Ar , el ^{14}C , el ^3H , el ^7Be y otros. Para el promedio mundial, la radiación cósmica supone un 10% de la dosis.

Figura 9.- La radiación cósmica que llega a la Tierra produce diferente dosis según la altitud y la latitud a la que nos encontremos (valores anuales en mSv).

Sin embargo, la mayor contribución a la dosis media recibida por los habitantes del planeta procede de la propia Tierra. En el subsuelo hay grandes cantidades de uranio, torio y otros elementos radiactivos que impregnan de radiactividad todo sobre el planeta (incluyendo nuestro propio organismo, véase la Fig.10). Así, se reciben cada hora unos 200.000.000 de rayos gamma procedentes del suelo y de los materiales de construcción, que causan un 14%

de

² Los datos numéricos que se citan en este apartado, salvo indicación expresa, se han tomado de las ref. 3 y 4 del Consejo de Seguridad Nuclear si se refieren a España, y de la ref.9 si se refieren al mundo.

la dosis promedio mundial. La Fig. 11 muestra el mapa de radiación natural en España por esta causa.



Figura 10.- Contenido radiactivo (en Becquerel, o desintegraciones por segundo) de distintos materiales naturales y artificiales.

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 edificios. Se puede decir que, en promedio, en los pulmones de un habitante de España se desintegran cada hora unos 30.000 átomos, que emiten partículas α o β y algunos rayos γ . Estos contribuyen aproximadamente al 52% de la dosis promedio mundial.

Por último, con los alimentos y bebidas también ingerimos radionucleidos naturales, destacando el uranio y sus descendientes y sobre todo el ^{40}K , del que el organismo humano es portador de una cantidad suficiente como para que cada hora se desintegren en él unos 15.000.000 de átomos. 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 12% de la dosis media mundial.

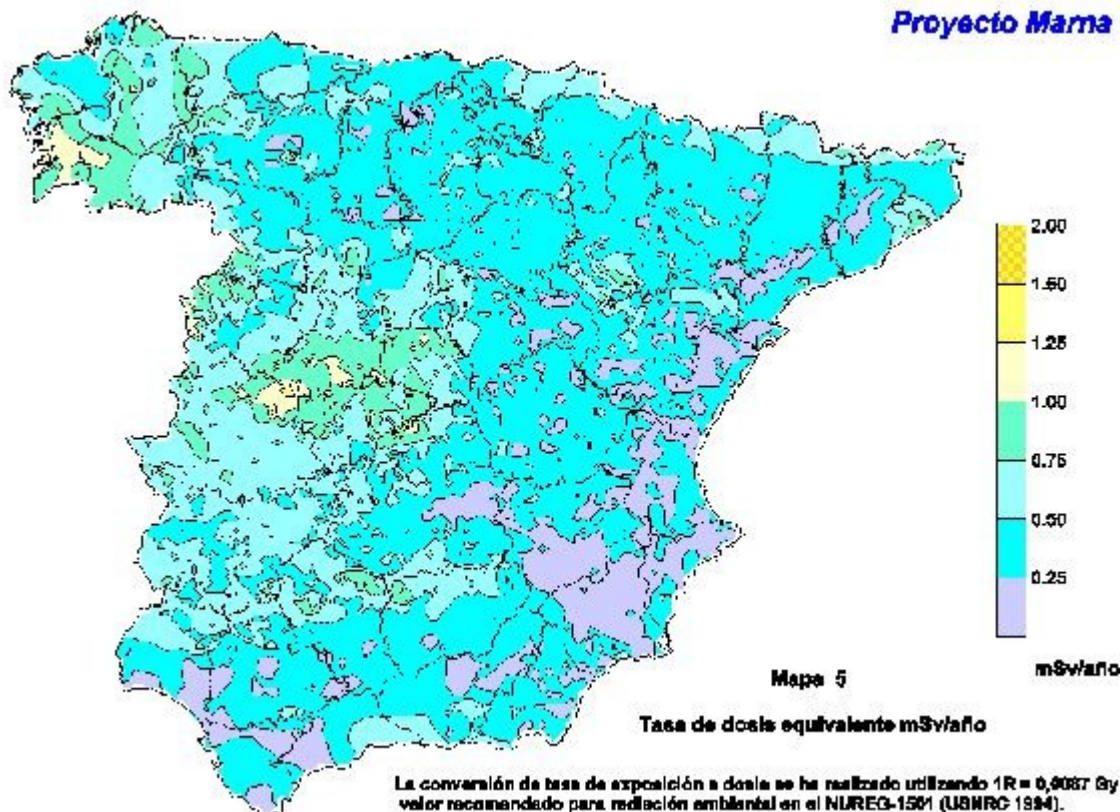


Figura 11.- Mapa de la radiación natural de fondo en España. El Proyecto MARNa, del Consejo de Seguridad Nuclear y la Empresa Nacional del Uranio, ha tenido como objetivo la elaboración del MAPa de la Radiación NATural de nuestro país. En la imagen se muestran los valores de la tasa de dosis equivalente en mSv/año (Fuente: página Web del CSN).

Entre las fuentes de radiación ionizante producidas por el hombre destacan especialmente, tanto por su cantidad como por su utilidad, las de utilización médica: las radiaciones ionizantes ayudan enormemente tanto en el diagnóstico de enfermedades como en su curación. Para el diagnóstico son fundamentales los rayos X y el empleo de isótopos en medicina nuclear. Para la curación del cáncer se emplean fuentes intensas de radiación, con las que precisamente se busca destruir las células del tejido enfermo. Sin considerar el uso de las radiaciones en la terapia contra el cáncer, se puede afirmar que la dosis media recibida por la población de un país desarrollado como España, solo con fines de diagnóstico, es del orden de 1,05 miliSievert por año, aunque algunas personas pueden recibir dosis tan altas como 100 miliSievert. No obstante, puesto que no todos los países disponen de suficientes medios, las aplicaciones médicas solo representan un 11,4% en el promedio de dosis mundial.

La radiación y las sustancias radiactivas tienen numerosas aplicaciones en la industria y en la vida cotidiana: detectores de humo, relojes luminosos, sensores de nivel en tanques y en máquinas para llenado de bebidas, sensores de densidad para la fabricación del papel o de los cigarrillos, fuentes de gammagrafía industrial para verificación de soldaduras en conducciones de gas, etc., son sólo algunos ejemplos de su utilidad. Unidos al incremento de dosis por la radiación cósmica recibida al viajar en avión suponen un 0,3% de la dosis mundial.

La lluvia radiactiva producida por los ensayos de armamento nuclear en la atmósfera en los años 50 y 60 o el accidente de Chernobil, también suponen una pequeña exposición de la población de todo el planeta (0,3% del total anual), cifrada actualmente en unos pocos microSievert al año (0,01 miliSievert).

Para terminar, la producción de energía eléctrica también libera radiactividad al medio ambiente. No sólo las centrales nucleares, sino que también la combustión del carbón libera radionucleidos naturales. La dosis recibida en promedio por causa de la energía nuclear entre la población de España es inferior a 0,001 miliSievert, aunque un pequeño número de personas, en el entorno próximo de las centrales nucleares, puede recibir dosis mayores, que en todo caso no superan los 0,01 miliSievert al año.

Como resumen de todo ello, las Figs. 12 y 13 representan las dosis medias anuales que recibe la población mundial y la española por todas las fuentes de radiación ionizante.

Figura 12.- Contribución de las diferentes fuentes de radiación naturales y artificiales a la dosis media total anual recibida por la población mundial (ref. 14).

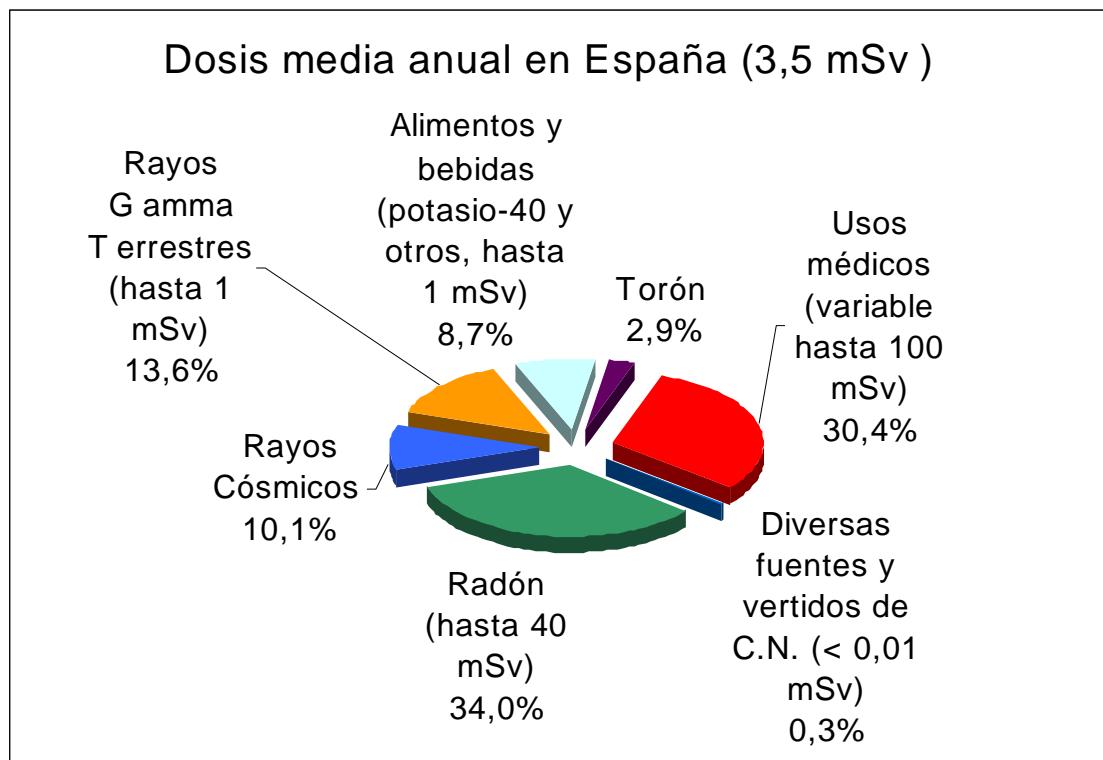


Figura 13.- Dosis medias anuales recibidas por la población española por todas las fuentes de radiación ionizante. (Datos tomados de la ref. 3). Como se observa en la figura, la dosis media anual recibida en España es de 3,5 mSv, si bien pueden darse grandes variaciones entre individuos que tengan distintos hábitos, que vivan en distintas zonas con elevada concentración de radón o radiación gamma de fondo, o que se vean sometidos a tratamientos médicos más intensos. La importancia relativa de la dosis producida por otras fuentes artificiales, entre ellas los vertidos de las centrales nucleares, es despreciable frente a dichas variaciones de la dosis recibida en la vida cotidiana.

6.- LA PROTECCION RADIOLOGICA Y SUS PRINCIPIOS BASICOS

A la vista de 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), ya citada-

, que se preocupa de emitir una serie de recomendaciones, 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 están actualmente incorporadas en España en el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes (ref. 6), que será revisado próximamente, en coordinación con la Comunidad Europea (ref. 7), para adaptarlo a las últimas recomendaciones de la Comisión (ref. 2).

La protección radiológica tiene un doble objetivo fundamental: evitar la aparición de los efectos deterministas, y limitar la probabilidad de

incidencia de los efectos probabilistas (cánceres y defectos hereditarios) 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 a la sociedad o sus individuos.

A los efectos de la protección radiológica se definen las prácticas como todas aquellas actividades 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 básicos:

a) Justificación: Toda práctica 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: Para cualquier fuente de radiación, las dosis individuales, 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).

c) Limitación de dosis y riesgos individuales: La exposición individual al conjunto de fuentes susceptibles de control ha de estar sujeta a límites en la dosis recibida y, en el caso de exposiciones potenciales, a cierto control del riesgo.

Los anteriores principios implican que, además de las operaciones o situaciones normales, haya que considerar las exposiciones potenciales por causa de accidentes. Generalmente, para estos casos, las limitaciones se establecerán con respecto a su probabilidad de ocurrencia. Este requisito se puede satisfacer aplicando técnicas probabilistas para la cuantificación del riesgo. Dichas técnicas son ya hoy en día comúnmente aplicadas en el caso de las centrales nucleares.

La justificación de una práctica 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.

Por último, la limitación de dosis tiene como finalidad la protección de los individuos más expuestos, para garantizar que no se alcancen niveles inaceptables del riesgo de sufrir daños a la salud. Los límites, que se aplican a las exposiciones debidas a prácticas, exceptuando la exposición a fuentes naturales y la exposición médica, van a sufrir una disminución como consecuencia de las últimas recomendaciones de la ICRP (ref. 2), que se sustentan en los últimos avances en radiobiología. La tabla III recoge los límites aplicables a la exposición ocupacional, definida como la recibida en el trabajo o como consecuencia de él, así como la producida en el trabajo por fuentes naturales cuando supere considerablemente los niveles ambientales en el entorno.

TABLA III
LÍMITES DE DOSIS PARA LA EXPOSICIÓN OCUPACIONAL

LÍMITES ANUALES DE DOSIS PARA LOS TRABAJADORES PROFESIONALMENTE EXPUESTOS (en mSv)		
Tipo de exposición	Reglamento Prot. Sanitaria (ref. 6)	Recomendaciones ICRP (ref. 2) y Directiva Europea 96/29 (ref. 7)
Exposición homogénea cuerpo entero o Dosis Efectiva	50	100 en 5 años ^(*) 50 máximo anual
Cristalino	150	150
Piel, manos, antebrazos, tobillos, o cualquier otro órgano individual	500	500
Mujeres en edad de procrear	13 mSv al trimestre	Igual que a los hombres
Mujeres gestantes (dosis al feto)	10 mSv total	2 mSv total

(*) En promedio no se deberán superar los 20mSv al año. En España, en 1998, sólo 49 trabajadores de un total de 83.200 profesionalmente expuestos superaron ese valor (ref.11), lo cual indica la buena situación de las instalaciones para el cumplimiento de los nuevos límites, que estarán vigentes en el año 2000.

Los límites indicados para la exposición a todo el cuerpo se recomiendan por comparación con el nivel de riesgo existente en actividades profesionales consideradas como especialmente seguras. Los límites especiales al cristalino, piel y órganos se adoptan para prevenir la aparición de efectos deterministas derivados de la irradiación de dichos órganos. Además, existen límites secundarios para la incorporación por inhalación de cada radionucleido, dependiendo de su toxicidad y metabolismo, así como límites derivados de concentración en aire en el trabajo.

Por su parte, la tabla IV muestra los límites establecidos para acotar la exposición del público en general. También en este caso se fijan límites

derivados de incorporación al organismo, por inhalación e ingestión, para cada radionucleido. Para cada instalación concreta, han de aplicarse en el diseño límites restringidos, que eviten con razonable prudencia la superación de estos límites por cualquier individuo, tomando como referencia aquellos que puedan estar más expuestos. Así, en el caso de las centrales nucleares, para limitar la exposición del público por vertido de efluentes se toman como referencia los límites indicados en la tabla V. El titular ha de realizar un estudio Analítico-Radiológico del emplazamiento, en un radio de 30 km, teniendo en cuenta el uso de la tierra y agua, demografía, costumbres, etc., además de la meteorología e hidrología locales, con el objetivo de determinar el grupo crítico de población y las dosis resultantes. Como se indicó en el apartado anterior, y según puede comprobarse en la Fig. 14, la dosis finalmente recibida por la población más cercana a las centrales no supera actualmente los 0,01 miliSievert.

TABLA IV
LÍMITES DE DOSIS PARA LA EXPOSICIÓN DE LOS MIEMBROS DEL PÚBLICO

LÍMITES ANUALES DE DOSIS PARA LOS MIEMBROS DEL PÚBLICO (en mSv)		
Tipo de exposición	Reglamento Prot. Sanitaria (ref. 6)	Recomendaciones ICRP (ref. 2) y Directiva Europea 96/29 (ref. 7)
Exposición homogénea cuerpo entero o Dosis Efectiva	5	1
Cristalino	15	15
Piel, manos, antebrazos, tobillos, o cualquier otro órgano individual	50	50

TABLA V
LÍMITES DE DOSIS ANUALES PARA LA EXPOSICIÓN DEL PÚBLICO POR VERTIDO DE EFLUENTES EN LAS CENTRALES NUCLEARES

LÍMITES DE DOSIS ANUALES (en mSv) PARA MIEMBROS DEL GRUPO CRÍTICO. OBJETIVOS DE DISEÑO.		
ORGANO	EFLUENTES GASEOSOS	EFLUENTES LIQUIDOS
Todo el cuerpo	0.05 (gases nobles)	0.03
Piel	0.15 (gases nobles)	-
Cualquier órgano	0.15 (radioyodos y partículas)	0.10

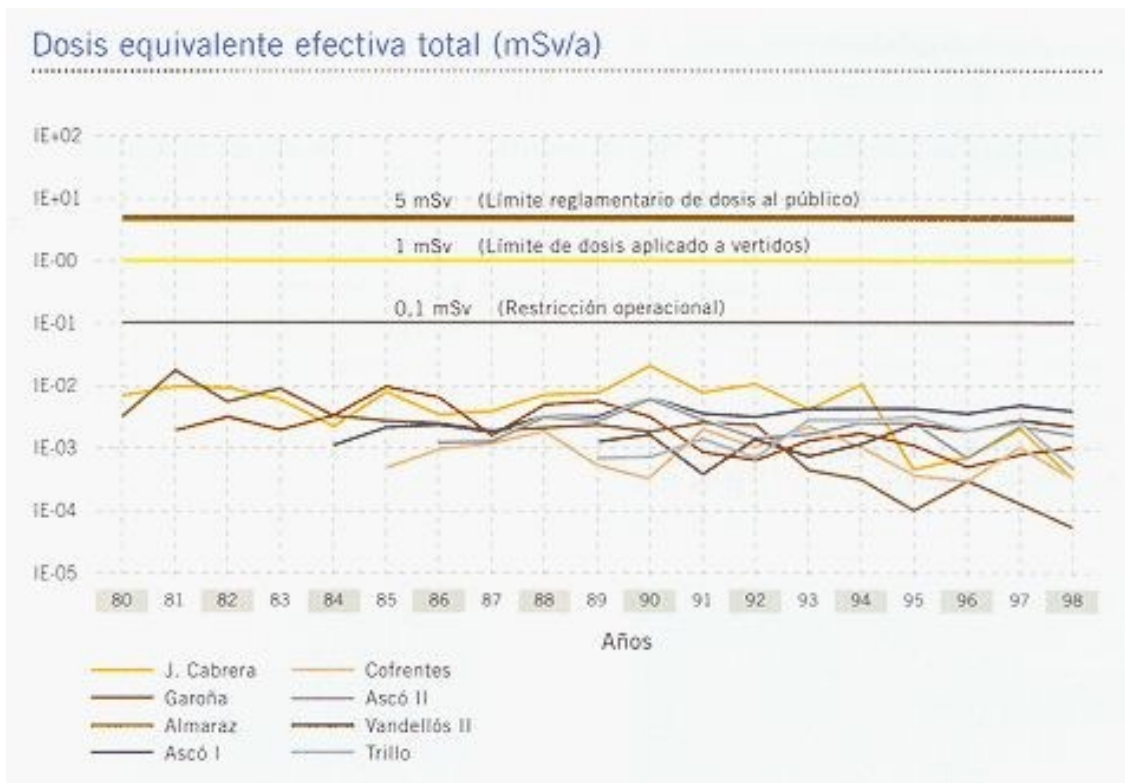


Figura 14.- Dosis efectiva anual causada por la descarga de efluentes de las centrales nucleares españolas en la población más expuesta de su entorno (años 1980 a 1998) (ref. 11).

6.1 La protección de los trabajadores, el público y el medio ambiente.

Además de lo ya expuesto, y como colofón al tema, se pueden citar otras cuestiones de tipo práctico con las que la reglamentación ayuda a garantizar un utilización segura de las radiaciones ionizantes y las sustancias radiactivas, tanto para los trabajadores, como para el público en general y el medio ambiente.

Así, la protección de los trabajadores de una instalación se hace basándose en el establecimiento de:

- Zonas y áreas de trabajo debidamente señalizadas (Fig. 15).
- Clasificación de los trabajadores según el riesgo potencial al que están sometidos (categorías A y B).
- Control y registro individual de la dosis recibida por vía externa mediante dosímetros.
- Control de la posible incorporación de material radiactivo al organismo mediante detección externa y análisis de muestras biológicas.
- Realización de exámenes de salud periódicos y especializados.



Figura 15.- Algunas de las señales empleadas para la identificación de zonas según sus riesgos en las instalaciones nucleares y radiactivas.

Para el conjunto de los trabajadores profesionalmente expuestos en España, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) mantiene un registro centralizado de la dosis recibida en el banco de datos dosimétricos y ha impuesto el uso del llamado carnet radiológico, documento personal del trabajador en el que se han de consignar todas las dosis que el trabajador pueda recibir en cualquier instalación.

Con respecto a la protección del público y del medio ambiente, además de establecerse los límites para los vertidos de efluentes de cada instalación, se lleva a cabo una estrecha vigilancia del medio ambiente, reforzada en el entorno de los emplazamientos nucleares. Para comprobar el impacto real de las centrales nucleares, el CSN establece los programas de vigilancia radiológica del medio ambiente (PVRA, Fig. 16), en los que se comprueba mediante la toma de miles de muestras de sustancias ambientales (unas 2000 muestras y unos 13.000 análisis cada año) la ausencia de contaminación significativa. Se toman muestras de suelos, agua de lluvia, cultivos, leche, carne, aves y huevos, peces, agua potable, agua subterránea, agua superficial y sedimentos. Además

existen una serie de puntos (del orden de 30) en los que se mide continuamente la radiación de fondo y la presencia de radiactividad para poder detectar cualquier desviación. Las muestras tomadas y los análisis practicados son objeto de verificación y contraste por entidades independientes de las centrales (algunas Comunidades Autónomas, laboratorios especializados, como el CIEMAT), a las que el CSN encomienda esa misión.

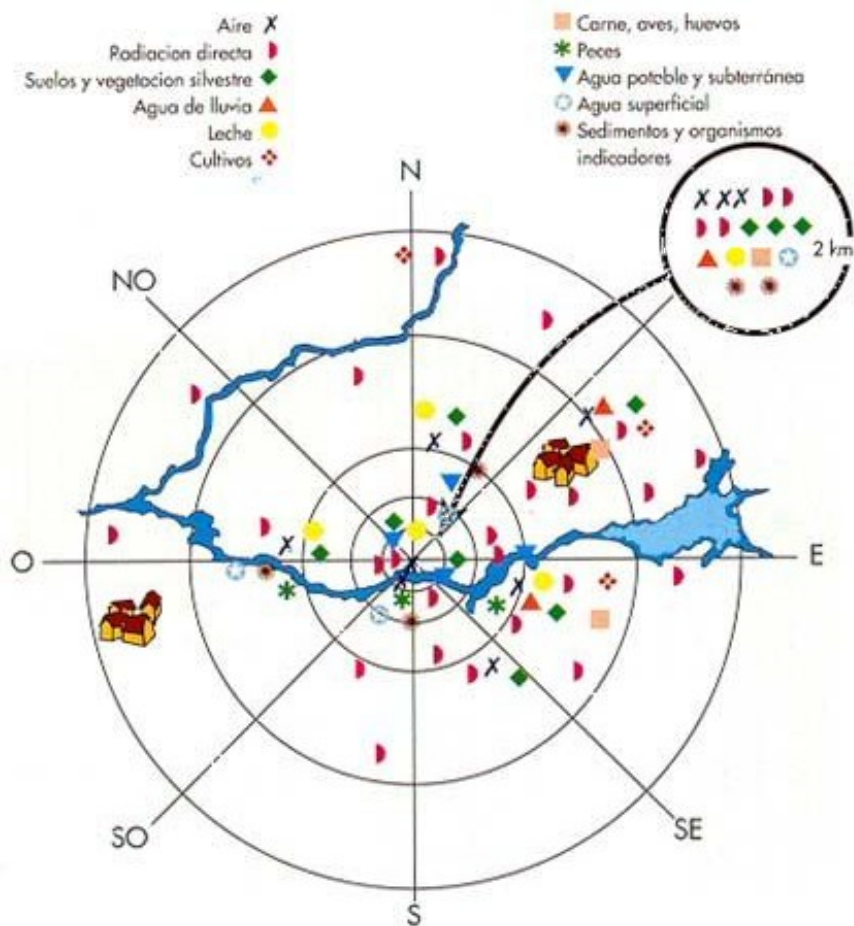


Figura 16.- Esquema de las zonas abarcadas por un Plan de Vigilancia Radiológica Ambiental tipo, así como de los puntos de medida en continuo y de muestreo de la radiactividad en las sustancias ambientales (ref.12).

Además, para cubrir la vigilancia de la totalidad del territorio nacional, el CSN dispone de una red de vigilancia de la radiación (la red REVIRA, Fig. 17) que comprende tres sistemas diferenciados:

- Una serie de estaciones de detección y medida en continuo de la radiactividad ambiental, con transmisión de señales al CSN (y cuyos valores medios se pueden consultar por el público en general en Internet: www.csn.es)
- Unos laboratorios asociados que llevan a cabo un programa de muestreo y análisis de la radiactividad ambiental en todo el país.

- La vigilancia radiológica de las aguas continentales españolas, llevada a cabo por el Centro de Estudios y Experimentación del Ministerio de Fomento.

Valores de la Red de Vigilancia Radiológica Ambiental (REVIRA)

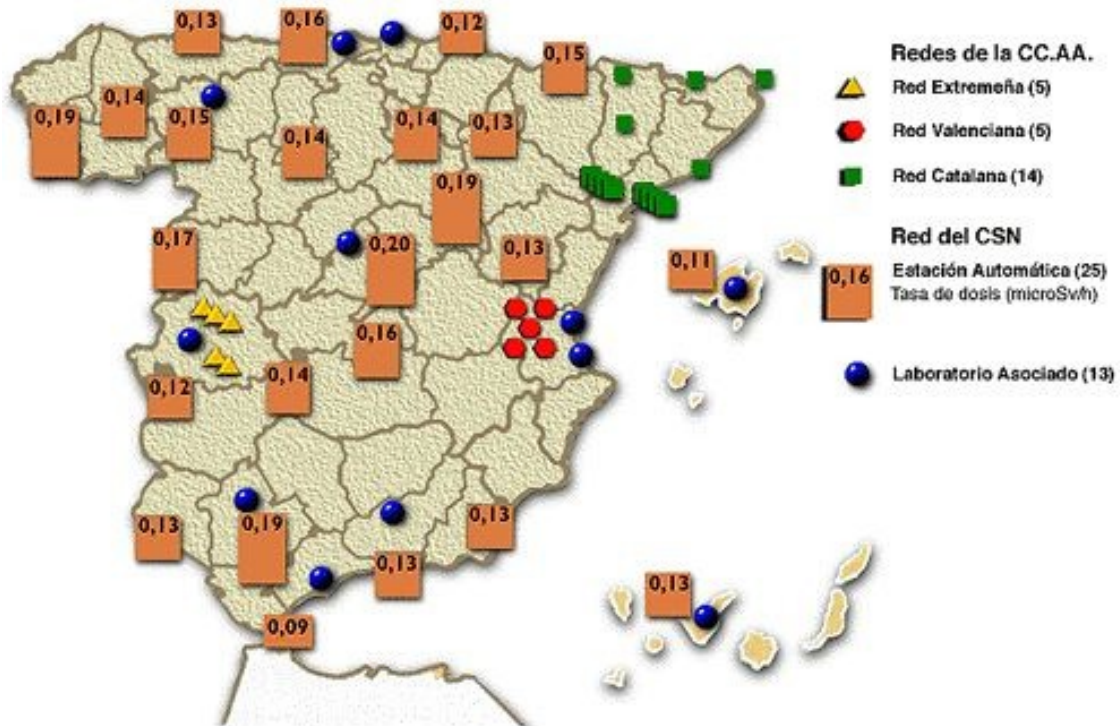


Figura 17.- Mapa de la red REVIRA, con indicación de las estaciones de medida, los valores medios de la tasa de dosis en cada una de ellas, las redes autonómicas asociadas y los laboratorios asociados (tomada de la página Web del CSN).

También existe en España otra red muy densa, la Red de Alerta a la Radiactividad, RAR, de la Dirección General de Protección Civil, con más de 900 estaciones de medida que registran y transmiten, en tiempo real, los datos de radiación ambiental tanto a Protección Civil como al CSN. Esta red, de menor sensibilidad y precisión que REVIRA, tiene por objeto principalmente la detección de cualquier situación accidental o de cualquier escape incontrolado de material radiactivo a la atmósfera, originado dentro o fuera de nuestras fronteras.

7. CONCLUSIONES.

Después de lo presentado anteriormente, cabe deducir las conclusiones siguientes, a modo de resumen final:

Primera.- Sobre los efectos causados por la radiación ionizante. Se ha visto como la radiación ionizante puede causar distintos daños sobre las células, que para resultar observables a nivel orgánico, produciendo efectos somáticos agudos, han de superar ciertos valores mínimos en la dosis (dosis umbral). Por otra parte, el daño en el ADN celular puede llegar a convertirse en un cáncer si la mutación progresa y de la multiplicación celular resulta finalmente un número suficientemente grande de células como para constituir un tumor. Cuando el ADN dañado es el de las células reproductoras, cabe la posibilidad de que se transmitan daños hereditarios a la descendencia. Estos procesos son altamente improbables, ya que el ser humano sufre cada día muchos millones de ionizaciones en su masa de ADN, mientras que sólo unos pocos cánceres y defectos genéticos son atribuibles a la radiación.

Segunda.- Sobre las fuentes de radiación ionizante. El ser humano está constantemente expuesto a múltiples fuentes de radiación ionizante. Las radiaciones provenientes de la propia Tierra y del espacio dominan la dosis total recibida. Especialmente elevada puede llegar a ser la dosis producida por la desintegración en los pulmones del gas radón y de sus descendientes radiactivos, formados a partir de la desintegración del uranio presente en la corteza terrestre. De entre las fuentes artificiales, la dosis media recibida es debida, en su mayor parte, a la utilización médica de las radiaciones ionizantes. Frente al resto de fuentes de radiación ionizante, los efluentes gaseosos y líquidos descargados por las centrales nucleares producen una dosis completamente despreciable, incluso para las personas que habitan en sus proximidades. Este hecho está avalado por los continuos controles y análisis que se realizan en los emplazamientos y su verificación por el Consejo de Seguridad Nuclear.

Tercera.- Sobre los objetivos de la protección radiológica. Dada la toxicidad de las radiaciones ionizantes, ante la abundancia de fuentes naturales y artificiales emisoras de tales radiaciones, un objetivo inmediato de la Protección Radiológica será evitar la aparición de los efectos sanitarios de tipo inmediato, manteniendo la dosis recibida por cualquier persona por debajo de los umbrales de aparición de tales efectos. Con respecto a los efectos probabilistas (cánceres y defectos hereditarios), habrá de limitarse su probabilidad de aparición a valores que se consideran seguros. Pero, por otra parte, sin limitar injustificadamente aquellas prácticas que, aunque supongan una exposición a las radiaciones, proporcionen un beneficio mayor para la sociedad o sus individuos. Para conseguirlo, se aplican los tres principios de la justificación, limitación de las dosis y riesgos individuales y optimización en busca del beneficio máximo. Para asegurar su cumplimiento, se establecen una serie de actuaciones y controles sobre los trabajadores y sobre el medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. PNUMA Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Radiación, Dosis, Efectos, Riesgos, segunda edición en español por el Consejo de Seguridad Nuclear. Madrid (1989).
2. ICRP International Commission on Radiological Protection. 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 (1996).
3. CSN Consejo de Seguridad Nuclear, Dosis de radiación. Madrid (1992).
4. CSN Consejo de Seguridad Nuclear, Protección radiológica. Madrid (1992).
5. Shapiro J., Radiation Protection. A Guide for Scientists and Physicians. 2nd Edition. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts (1981).
6. MRC Ministerio de Relaciones con las Cortes y de la Secretaría del Gobierno. Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, Real Decreto 53/1922 (BOE 12-febrero-1992). Madrid (1992).
7. EURATOM, Directiva 96/29 de 13 de mayo de 1996, por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Luxemburgo (29 de junio de 1996).
8. NRC U.S. Nuclear Regulatory Commission. Health Effects Models for Nuclear Power Plant Accident Consequence Analysis. Report NUREG/CR-4214. Washington D.C. (1993).
9. UNSCEAR United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources, Effects and Risks of Ionising Radiation, Report to the General Assembly, United Nations. New York (1988).
10. Sollet E.. y Velasco E., La Naturaleza de la Radiación. Iberdrola, Madrid (1997)
11. Consejo de Seguridad Nuclear. Memoria Anual 1998. Madrid (1999).
12. Consejo de Seguridad Nuclear. La vigilancia de la radiación. Madrid (1992).
13. Alonso A., El riesgo de las radiaciones: La experiencia de Chernóbil-4.

Conferencia Inaugural del VI Congreso de la Sociedad Española
de
Protección Radiológica. Córdoba, 24 a 27 de septiembre de
1996.

14. Saunders P., La Radiación y Tú. Comisión Europea y Consejo de Seguridad Nuclear (1990).