

CAPITULO 4

LA RADIACION Y EL HOMBRE

FUENTES DE IRRADIACION AL HOMBRE. FUENTES NATURALES Y ARTIFICIALES

En nuestros días, se observa una atención creciente de la opinión pública hacia los temas relacionados con el medio ambiente y la calidad de vida. Uno de los fenómenos que inciden sobre la sensibilidad del público es el del uso por el hombre de las radiaciones ionizantes. Existe, en ciertos medios, la opinión de que un individuo corre un riesgo desproporcionado al utilizar tales radiaciones ionizantes. Tal opinión parece basarse en la creencia de que el efecto de la radiactividad sobre una persona procede únicamente del uso humano de la radiación. Esta hipótesis es falsa. En efecto, como veremos más adelante, la radiactividad natural de orígenes diversos constituye la mayor fuente de radiación para el conjunto de la humanidad. E indudablemente, las múltiples aplicaciones con fines médicos, industriales, de investigación o militares han introducido nuevas fuentes de radiación, que denominaremos "fuentes artificiales", y que contribuyen a aumentar de un modo mucho menos constante y homogéneo que la radiactividad natural, el valor de la dosis actual para el conjunto de la población y, especialmente, para determinados grupos de ella.

Vamos a referirnos a continuación, de forma muy breve, a cada uno de los componentes de la radiactividad natural y artificial, con el fin de que pueda adquirirse un conocimiento de los mismos y una idea del orden de magnitud de la dosis que, de cada uno de ellos, se deriva para los seres humanos. Ello permitirá hacer una estimación adecuada de la incidencia biológica de las fuentes energéticas nucleares y del resto de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear.

Radiactividad natural

Los seres vivos están sometidos a la irradiación derivada de las fuentes que constituyen la radiactividad natural del medio ambiente y que proceden, por una parte, de la existente entre los materiales que constituyen la corteza terrestre y, por otra, de la correspondiente a fuentes extraterrestres originadas en nuestra galaxia y especialmente en el Sol, y constituyen la radiación cósmica. Ambas fuentes de radiación tienen un componente externo, que afecta al hombre desde el exterior del organismo y origina la irradiación externa, y un componente interno, que es consecuencia de la incorporación por el organismo de los radionucleidos naturales y los cosmogénicos, a través de la ingestión e inhalación, y que da lugar a la irradiación interna. Consecuencia de este componente interno es el hecho de que en todos los seres vivos se encuentren trazas de radiactividad natural (figura 39).

– Radiactividad terrestre

a) Radionucleidos primordiales

La irradiación del hombre por la radiactividad terrestre es debida a los radionucleidos que existen en el suelo y a aquellos que se han transferido desde el suelo a la atmósfera, a la hidrosfera y a los alimentos, es decir, que se encuentran en el medio ambiente.

De los 340 nucleidos que se han encontrado en la naturaleza, aproximadamente 70 son radiactivos y corresponden principalmente a elementos pesados. La mayoría de estos isótopos de elementos pesados pertenecen a las tres series radiactivas que están encabezadas por el Uranio-238, el Uranio-235 y el Torio-232 y que constituyen respectivamente las series del Uranio, del Actinio y del Torio. Varios de los radionucleidos de estas series y de los no pertenecientes a las mismas tienen períodos de semidesintegración del mismo orden de magnitud que el estimado para la edad de la Tierra, $4,5 \cdot 10^9$ años, y se desintegran hasta nucleidos estables, bien a través de una serie de radionucleidos, bien directamente. Los isótopos estables finales de las tres series citadas corresponden al elemento Plomo.

El Uranio, que se encuentra normalmente en la naturaleza, está constituido por los tres isótopos, Uranio-238, Uranio-235 y Uranio-234, en las proporciones de 99,28 %, 0,71 % y 0,0058 % respectivamente. Ahora bien, debido a su pequeñísima actividad específica, es decir actividad por gramo, tanto éstos como el Torio-232 apenas tienen influencia directa en la dosis total recibida por los seres vivos. Son sus descendientes, el Radio-226 y el Radio-224, los radionucleidos gaseosos Radón-222 y Radón-220 y todos sus sucesivos radionucleidos correspondientes a sus series radiactivas, que vuelven a ser sólidos y que, debido al carácter gaseoso de sus progenitores contribuyen considerablemente al grado de actividad de la atmósfera, especialmente en las capas inferiores de la misma.

De los radionucleidos primordiales que no pertenecen a ninguna serie radiactiva y que, por su desintegración, se transforman en núcleos estables, sola-

mente el Potasio-40 y el Rubidio-87 constituyen fuentes significativas de radiación; el K-40, por ser emisor beta-gamma, tiene interés por su contribución a la irradiación interna y se encuentra en la proporción de 0,63 Bq (17 pCi) por gramo de Potasio natural y el Rubidio-87 en la proporción de 0,074 Bq (2 pCi) por gramo de Rubidio natural, pero dada la abundancia de Potasio en relación con el Rubidio, es aquél el que contribuye entre los de este grupo con mayor intensidad al fondo de la radiactividad natural

Con respecto a la irradiación externa, los radionucleidos de mayor importancia son el Potasio-40 y los diversos emisores gamma de las series del Uranio-238 y del Torio-232 y, como consecuencia del contenido típico de los suelos, se deduce que el Potasio-40 y la serie del Torio-232 dan lugar, cada uno, a una media de 150 a 300 μSv (15 a 35 mrem) por año, y la serie del Uranio a 100-200 μSv (10-12 mrem) por año. Esta dosis es debida al conjunto de los radionucleidos que se encuentran en el suelo y a los descendientes del Radón que se encuentran en la atmósfera. Las variaciones en los valores de las mismas dependen, además, de otros factores, tales como el contenido en humedad del suelo, la presencia de nieve y las condiciones meteorológicas.

Es interesante hacer constar que, a veces, y en función de los materiales de construcción empleados en las viviendas, el nivel de dosis existente en su interior puede ser superior al del exterior, ya que el blindaje que proporcionan con respecto a la radiación del exterior puede estar compensada o superada por la derivada de los radionucleidos contenidos en los materiales de construcción, por ejemplo, el empleo de granito o de yesos no naturales, resultantes, como subproductos, de la industria de los fosfatos, que contienen Radio en cantidad significativa.

El contenido en el interior del organismo de estos radionucleidos primordiales contribuye también, de forma importante, a la dosis total recibida por los seres vivos. Su incorporación a los seres humanos se produce a través de los alimentos, agua y aire principalmente, si bien no hay que olvidar que, ciertas costumbres también contribuyen a ello, por ejemplo, el fumar constituye una fuente importante de incorporación del Plomo-210 y del Polonio-210, ambos radiactivos.

De todos estos radionucleidos, el Potasio-40 es el que en mayor grado contribuye a la dosis interna, siguiéndole en orden decreciente de magnitud el Radio-226, Radio-228, Plomo-210, Polonio-210 y Uranio

En la tabla siguiente se exponen los valores de las dosis equivalentes que los tejidos más significativos reciben internamente a causa de dichos radionucleidos.

Radionucleidos	Gónadas $\mu\text{Sv/año}$ (mrem/año)	Médula ósea $\mu\text{Sv/año}$ (mrem/año)	Osteocitos $\mu\text{Sv/año}$ (mrem/año)
Potasio-40	190 (19)	150 (15)	60 (6)
Rubidio-87	3 (0,3)	6 (0,6)	4 (0,4)

Radionucleidos	Gónadas μSv/año (mrem/año)	Médula ósea μSv/año (mrem/año)	Osteocitos μSv/año (mrem/año)
Uranio natural	8 (0,8)	9 (0,9)	124 (12,4)
Radio-226	2 (0,2)	12 (1,2)	164 (16,4)
Radio-228	3 (0,3)	10 (1,0)	190 (19,0)
Radón-222	4 (0,4)	4 (0,4)	2 (0,2)
Polonio-210	60 (6)	48 (4,8)	600 (60)

b) Radionucleidos cosmogénicos

Como consecuencia de la interacción de la radiación cósmica con los núcleos de los átomos de los elementos que se encuentran en la atmósfera se produce una serie de radionucleidos inducidos, a los que podemos denominar cosmogénicos y que se encuentran tanto en la superficie de la Tierra como en la atmósfera. También se originan en menor proporción por interacción de los neutrones, protones y piones secundarios con los materiales situados en los dos primeros metros de la superficie terrestre.

Estos radionucleidos son los que a continuación se especifican, incluyendo entre paréntesis su período de semidesintegración y emisión radiactiva

- Tritio (12,3 años, beta)
- Berilio-7 (53 días, gamma)
- Carbono-14 (5.730 años, beta)
- Sodio-22 (2,62 años, beta y gamma)
- Fósforo-32 (14,5 días, beta)
- Fósforo-33 (24,4 días, beta)
- Azufre-35 (87,9 días, beta)
- Cloro-36 ($3,08 \times 10^5$ años, beta)
- Kriptón-81 ($2,1 \times 10^4$ años, rayos X)
- Argón-39 (269 años, beta)

Entre estos radionucleidos se encuentran, en consecuencia, emisores beta, gamma y de rayos X y de ellos, los más importantes, desde el punto de vista de su incidencia en las dosis que reciben los seres vivos, son el Tritio (H3), el Carbono-14, el Sodio-22 y el Berilio-7. Los tres primeros son isótopos de elementos que forman parte de las moléculas constitutivas de los seres vivos.

El Carbono-14 se produce a partir del Nitrógeno-14, por captura de neutrones en la parte superior de la atmósfera. Su ritmo de producción se mantuvo prácticamente constante durante, por lo menos, 15 000 años antes de 1954, fecha a partir de la cual, y como consecuencia de las pruebas con bombas nucleares primero y posteriormente de la operación de los reactores nuclea-

res, se han producido nuevas cantidades que han modificado los valores naturales.

El Tritio, que se forma por interacción con los gases de la capa superior atmosférica, se encuentra principalmente en forma de vapor de agua y se deposita en la superficie terrestre con la lluvia y la nieve. Su concentración también se ha modificado a partir de 1954.

El contenido de Carbono en el organismo de las personas es de 12,6 kg para un peso de 70 kg; en consecuencia, el contenido total de Carbono-14 es del orden de 3.700 Bq. Debido a la pequeña energía de las partículas beta emitidas por dicho radionucleido, la dosis que se ha estimado recibe el organismo a partir de él es del orden de 8 μSv (0,8 mrem) al año por el esqueleto y 7 μSv (0,7 mrem) por las gónadas.

El Tritio se encuentra en las aguas de los ríos en una concentración de 5×10^{-18} con respecto al Hidrógeno, o sea 0,55 Bq/litro, aproximadamente; en consecuencia, y suponiendo que se encuentra en la misma proporción en los tejidos orgánicos, se ha calculado que dará lugar a una dosis de 18×10^{-13} μSv ($1,8 \times 10^{-13}$ mrem) al año a todos los tejidos blandos.

Para el Sodio-22 se ha calculado una dosis de 200 nSv al año y para el Berilio-7 de 80 nSv al año.

O sea, que el promedio de tasa de dosis a la totalidad del organismo humano, a partir de estos radionucleidos cosmogénicos, es inferior a 10 μSv (1 mrem) por año.

– Radiación cósmica

El término "radiación cósmica" incluye las partículas primarias energéticas de origen extraterrestre, que interaccionan con la atmósfera de la Tierra, y las partículas secundarias que se generan por dicha interacción con los componentes de la atmósfera.

La radiación primaria está constituida por dos componentes, las "partículas de la galaxia", que proceden del exterior del sistema solar, y las "partículas solares" que son emitidas por el sol.

La radiación de la galaxia está constituida en un 87 % de protones, un 11 % de partículas alfa, un 1 %, aproximadamente, de núcleos pesados y un 1 %, aproximadamente, de electrones.

El sol genera un flujo continuo de partículas cargadas de muy baja energía, el viento solar, que no alcanzan la atmósfera, sin embargo, como consecuencia de las perturbaciones magnéticas, que se producen ocasionalmente en el sol, se generan gran cantidad de partículas. La composición del flujo de partículas es variable, con valores de 10 a 90 para la relación entre protones y partículas alfa. También es variable el flujo anual de partículas a lo largo de los ciclos solares, con valores comprendidos entre 10^5 y 10^{10} partículas por cm^2 y año.

La radiación secundaria está constituida principalmente por neutrones, protones y piones y comprende la mayor parte de la radiación que existe entre el

nivel del mar y los 3.000 metros. La desintegración de los piones da lugar, a su vez, a la producción de electrones, fotones y muones

El conjunto de todos estos componentes especificados contribuye de un 30 a un 50 % a la dosis total recibida externamente por los individuos como consecuencia del conjunto de la radiactividad ambiental.

En la tabla siguiente se exponen los valores correspondientes a la variación de la dosis debida a la radiación cósmica en función de la altura (figura 40)

Altura, m	mGy/año	mrad/año
1.500	0,4-0,6	40-60
3.000	0,8-1,2	80-120
5.000	1,6-2,4	160-240
6.500	3-4,5	300-450
10.000	14	1.400
12.000	28	2.800
15.000	42	4.200
20.000	52	5.200

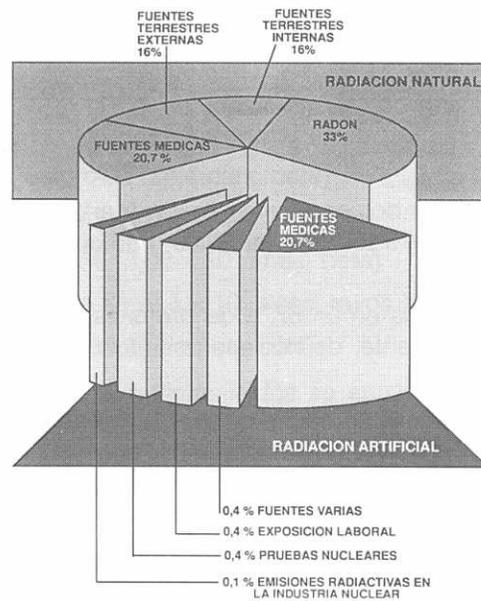
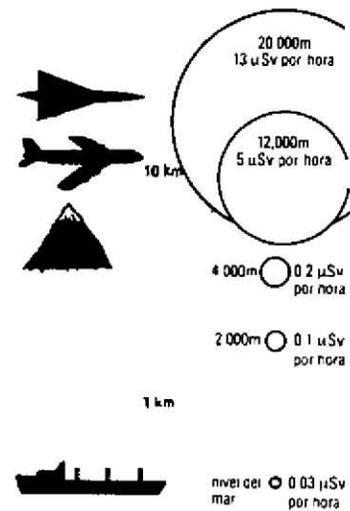


FIGURA 39.

NIVELES DE RADIACION COSMICA



μSv = microsievert

Aumento con la altura de la tasa de dosis equivalente procedente de la radiación cósmica (Nota: que el diagrama emplea una escala logarítmica)

FIGURA 40.

Radiactividad artificial

Como consecuencia de la utilización por el hombre de las radiaciones ionizantes para infinidad de aplicaciones médicas, industriales, bélicas y de investigación, se ha añadido un nuevo componente a la radiactividad natural que contribuye, de modo importante, al incremento de la dosis de radiación que actualmente reciben los seres humanos. Si bien este componente, como veremos posteriormente, sigue manteniéndose en valores inferiores al derivado de la radiactividad natural, en las naciones fuertemente industrializadas se está aproximando bastante a aquél. Por ejemplo, en los Estados Unidos, el valor medio individual, en 1971, se estimó que era del orden de los 1,18 mSv/año (118 mrem/año), mientras que la dosis media individual recibida de fuentes naturales es de 1,3 mSv/año (130 mrem/año).

La dosis debida a la que podemos denominar radiactividad artificial, tiene su fuente principal en las irradiaciones con fines médicos, y de menor importancia son las debidas a la utilización industrial de las radiaciones, al empleo con fines domésticos de aparatos que utilizan radionucleidos o generan radiaciones y finalmente a la contaminación producida por las pruebas de armas nucleares.

Las aplicaciones con fines de diagnóstico y terapia médicas son las que, como veremos a continuación, contribuyen en mayor grado a la dosis recibida por la población.

– Aplicaciones médicas

Los rayos X y los radionucleidos, que cada vez se utilizan más en medicina y biología, han contribuido enormemente al progreso alcanzado en el diagnóstico y la terapia, pero presentan como contrapartida el incrementar considerablemente la dosis de radiación media de los individuos y de la población en su conjunto. La causa principal es la radiografía con fines de diagnóstico que, en 1971 y en Estados Unidos, se ha calculado es la responsable del 90 %, aproximadamente, de la dosis total recibida a causa de fuentes artificiales. Para dar una idea al respecto indicaremos que, según una evaluación efectuada por el Servicio de Salud Pública de U.S.A., en 1964, las dosis en la superficie de la piel variaban entre 1,17 mGy (117 mrad) por radiografía para las extremidades y 7,9 mGy (790 mrad) para el abdomen.

La radiografía dental supone una dosis media en el cristalino de 0,2 a 10 mGy (1 139 mrad) Ahora bien, las dosis recibidas varían considerablemente en función de las técnicas y equipos empleados, siendo la radioscopia la causante de las mayores dosis.

Las estimaciones realizadas en Estados Unidos y Francia sobre las dosis recibidas en la totalidad del organismo para el conjunto de la población como consecuencia de las aplicaciones médicas de las radiaciones, son las siguientes:

Origen	Dosis, μSv (nrem/año)	
	Estados Unidos	Francia
Radiodiagnóstico	1030 (103)	600 (60)
Radioterapia	60 (6)	30 (3)
Radiofármacos	20 (2)	12 (1,2)

Como se verá, por comparación con las dosis recibidas a partir de otras fuentes artificiales de radiactividad, las aplicaciones médicas constituyen la mayor contribución a la dosis de radiación resultante de dichas fuentes artificiales.

– *Producción de energía electronuclear*

Como consecuencia del desarrollo de la industria electronuclear se producirá una gran cantidad de residuos que constituirán una fuente de radiación para la población. La mayor parte de estos residuos pueden ser confinados de forma que no impliquen un riesgo importante de irradiación. Sin embargo, hay una determinada cantidad de ellos que en estado líquido o gaseoso, pueden ser evacuados al medio ambiente a partir de ciertas fases de esta industria nuclear y que darán lugar a una determinada dosis de radiación al público.

Teniendo en cuenta los procedimientos que en la actualidad existen para el tratamiento de los residuos radiactivos gaseosos en las diversas instalaciones, los contaminantes con incidencia universal, que contribuyen en mayor grado a las dosis de radiación que la población mundial puede recibir a causa del funcionamiento de esta industria, son: Tritio, Carbono-14, Kriptón-85 y Yodo-129.

Desde el punto de vista de su incidencia sobre la población que habita en las proximidades de las centrales nucleares, y en función del tipo de reactor, hay que considerar, además, otros radionucleidos gaseosos, con períodos de semidesintegración pequeños, tales como los Argón-41, Xenón-133 y otros isótopos del Xenón y del Kriptón.

Como consecuencia de las estimaciones efectuadas para determinar la dosis total que puede recibir la población a partir de la explotación del conjunto de instalaciones que intervienen en la generación de la energía eléctrica, es decir, desde la minería del Uranio hasta el tratamiento de los combustibles irradiados, e incluyendo el transporte de los materiales radiactivos e incluso la probabilidad de accidentes, se ha llegado a la conclusión de que el conjunto de operaciones necesarias para la operación de una central nuclear de 1.000 MW(e) origina una dosis colectiva de 6 Sievert-persona. Teniendo en cuenta una media de consumo de 1 kilowatio eléctrico por persona y año, se deduce que la dosis que a cada persona corresponde a partir de estas fuentes, es del orden de los 60 μSv (6 mrem) por año.

– *Precipitaciones radiactivas derivadas de las pruebas nucleares*

Como consecuencia de las pruebas realizadas con bombas termonucleares,

un conjunto de radionucleidos pasaron a la estratosfera y, posteriormente, se van depositando sobre la superficie terrestre en forma de pequeñas partículas. Entre estos radionucleidos se encuentran, materiales fisionables no fisionados o producidos por interacción con neutrones, tales como el Plutonio-239, productos de fisión (Estroncio-90, Cesio-137, etc.), Tritio, originado principalmente durante el proceso de fusión utilizado para las bombas termonucleares, productos de activación formados en la cubierta de las bombas (Hierro-55, Zinc-65, Manganeso-54, Cobalto-60, etc.), y/o formados en el medio ambiente, en especial cuando la explosión tiene lugar en el suelo o próximo a él (Silicio-21, Aluminio-28, Sodio-24, Zinc-65, Hierro-55, etc.) y Carbono-14.

Estas precipitaciones, que fueron bastante importantes en los primeros años de la década de los sesenta, han ido reduciéndose a partir de la supresión de las pruebas atómicas. Estimaciones realizadas por UNSCEAR (Comité de las Naciones Unidas) han permitido deducir que la dosis derivada de esta fuente de radiación para los seres humanos será, hasta el año 2000, del orden de 33 μSv (3,3 mrem) por año en las gónadas, 75 μSv (7,5 mrem) por año para los huesos y 53 μSv (5,3 mrem) por año para la médula ósea.

– *Otras actividades*

Existen numerosas fuentes de radiación que forman parte de equipos de amplio uso público, cuya incidencia sobre el público no depende de las dosis que pueden originar individualmente, en general débiles, sino de su amplia distribución y frecuencia de utilización. Entre ellas se encuentran los relojes y otros objetos radioluminiscentes, los receptores de televisión en color, ciertos dispositivos electrónicos (tubos y lámparas para descarga; los pararrayos radiactivos, actualmente ilegales en España; detectores de humo, que emplean fuentes radiactivas, etc.).

Por otra parte, y como consecuencia de la radiación cósmica, los pasajeros y tripulaciones de los aviones reciben, durante los vuelos, tasas de dosis del orden de los 3 μSv (0,3 mrem) por hora; tasas de dosis que se duplican en los vuelos supersónicos como consecuencia de la mayor altura a que se realizan.

En la tabla siguiente se da la exposición a la radiación, procedente de fuentes naturales y artificiales (figura 41).

Dosis Equivalente efectiva media anual en mSv
(UNSCEAR - 1988)

	FUENTES NATURALES	
	INTERNAS	EXTERNAS
Cósmicas (Rayos cósmicos + Radionucleidos de origen cósmico)	0,015	0,355
Terrestres (K-40, Rb-87, Familias del U-238 y Th-232)	1,385	0,445
Total fuentes naturales		2,44

	FUENTES ARTIFICIALES	
	INTERNAS	EXTERNAS
Médicas	0,01	0,4 – 1 (*)
Precipitación radiactiva	0,004	0,006
Energía nuclear	0,002	
Total	0,43 – 1,03	

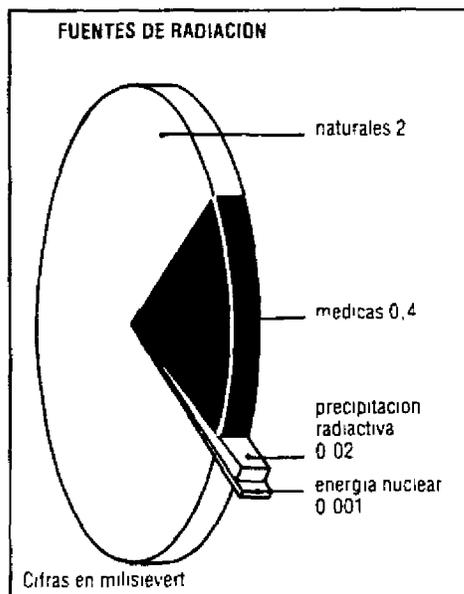
(*) Países desarrollados.

LA RADIACION Y EL HOMBRE

Todo organismo vivo, y en particular el cuerpo humano, está compuesto de muchas variedades y tipos de células, que son las unidades básicas de vida (figura 42)

Un organismo se compone de órganos agrupados en sistemas, y tales órganos están constituidos por los distintos tejidos. Un tejido está constituido de células con las mismas funciones especializadas, como el tejido muscular, tejido óseo y tejido epitelial (piel y revestimiento de las paredes de los pulmones y de los órganos del sistema digestivo).

Los tejidos típicamente crecen en capas desde una capa germinal de células. Las células varían en sus sucesivas etapas de desarrollo de células primitivas o inmaduras a las células adultas completamente maduras. La figura 43 ilustra el desarrollo de las células dentro de un tejido



Dosis equivalente efectiva media anual procedente de fuentes naturales y artificiales de radiación

FIGURA 41.

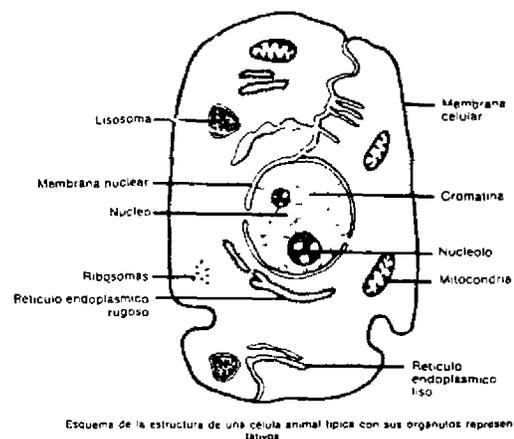


FIGURA 42

Mientras que las células adultas están completamente especializadas y son capaces de realizar sus funciones celulares, las células inmaduras no están tan especializadas, y están en un proceso de desarrollo, para finalmente reemplazar a las células adultas.

1 Las células adultas pueden ser caracterizadas por un ritmo bajo de división celular. Algunas células adultas, tales como las células de los glóbulos rojos, no se reproducen una vez que alcanzan su estado de madurez. A medida que se mueren las células adultas, van siendo reemplazadas por otras nuevas.

2. Las células primitivas o inmaduras tienen un ritmo mayor de división celular. Estas células crecen hacia el exterior desde una capa germinal mientras se dividen y desarrollan hasta células adultas. En la figura 43 se ve que las células adultas proporcionan un recubrimiento o capa sobre las células más jóvenes para protegerlas hasta que sean capaces de realizar la función de las células maduras.

La radiosensibilidad de una célula es una medida del grado (o facilidad) en que tipos específicos de células son afectadas por la radiación. Esto es generalmente valorado como la dosis de radiación absorbida que produce un efecto observado en la célula.

1 En general, las células primitivas o inmaduras, con un alto ritmo de división celular, son más radiosensibles que las adultas, que son células altamente especializadas.

2. Los tipos de células que son más radiosensibles a la radiación son

- a) Células inmaduras y adultas de los glóbulos blancos.
- b) Células inmaduras de los glóbulos rojos.
- c) Células inmaduras del sexo.
- d) Células inmaduras intestinales.
- e) Células inmaduras de la piel.
- f) Células de los capilares sanguíneos.

3 Los tipos de células que son moderadamente sensibles a la radiación son:

- a) Células inmaduras y adultas del hueso.
- b) Células inmaduras de los cartílagos.
- c) Células intermedias y adultas del sexo.
- d) Células adultas de los glóbulos rojos.
- e) Células de las venas.

4. Las células que son relativamente resistentes a la radiación son.

- a) Células adultas de cicatrices.
- b) Células adultas de cartílagos.
- c) Células del tejido muscular.
- d) Células nerviosas.

Debido a una severa irradiación de las células del tejido, resulta comúnmente una diferenciación del tejido, por ejemplo, las células inmaduras son mucho más afectadas que las células adultas y queda un hueco en el desarrollo de la célula del tejido, ya que mientras las células adultas mueren, éstas no van siendo reemplazadas por otras células (este efecto puede conducir a la ulceración del tejido).

Los tejidos pueden regenerar células germinales y reparar su daño, como la cicatrización de un corte en la piel. Los siguientes pasos se observan en la irradiación y regeneración del tejido:

1. Las células del tejido muestran signos de degeneración después de la exposición. El ritmo normal de división de la célula es anulado o reducido severamente.
2. Se produce una acumulación de sangre y fluido celular (edema) en un intento de limpiar las células muertas del tejido.
3. La reproducción celular se restablece, pero la división celular conduce a células degeneradas.
4. La reproducción celular continúa, posiblemente a un mayor ritmo, lo que conduce a la regeneración del tejido.

EFFECTOS AGUDOS DE LA RADIACION

Exposiciones agudas (dosis > 1 Sv (100 rem) recibidos en 1 día) causan una serie de síntomas claramente identificables y signos médicos que pueden ser fácilmente relacionados con la dosis de radiación.

A este conjunto de efectos agudos se le denomina síndrome (conjunto de síntomas de una enfermedad) de irradiación aguda.

1. Síndrome hematopoyético (tejido formador de la sangre) Este síndrome se observa médicamente como una disminución de la cantidad de células de la sangre y ocurre para dosis del orden de los 1 Sv (100 rem) para todo el cuerpo y se hace más intensa a medida que las dosis se acercan a 5 Sv (500 rem).

Los signos visibles de este síndrome son: a) hemorragia interna y falta de coagulación de la sangre, b) anemia y fatiga, y c) susceptibilidad de infección bacteriana. Sin tratamiento, la muerte es probable que ocurra de las dos a las cuatro semanas, como resultado del intenso derrame o por infección bacteriana, para valores de dosis a todo el cuerpo entre 4 y 6 Sv (400 y 600 rem).

2. Síndrome del tracto gastrointestinal. En el rango de 5 a 20 Sv (500 a 2.000 rem) para el cuerpo entero, el síndrome es caracterizado por el inmediato comienzo de vómitos y diarrea, los cuales persisten durante un largo tiempo. Durante este período también puede haber una intensa hemorragia interna. La muerte puede ocurrir de los cinco a los diez días después de la exposición, y es causada por una intensa deshidratación y desequilibrio electrolítico en los tejidos del cuerpo como resultado de la excesiva diarrea

3. Síndrome del sistema nervioso. Para dosis al cuerpo entero superiores a 50

Sv (5 000 rem), este síndrome está caracterizado por. a) falta de coordinación y confusión mental, b) coma intermitente y pérdida de conocimiento, y c) convulsiones. La muerte es inevitable, generalmente al cabo de dos días, por fallo respiratorio o del corazón.

Un resumen de estos efectos biológicos agudos causados por la radiación se puede contemplar en la figura 44, la cual relaciona el efecto con el rango de dosis estimada para la probable ocurrencia en el hombre.

Efectos agudos aparecen a distintos valores de dosis según cual sea el órgano irradiado, en el caso de irradiación parcial, por ejemplo si el órgano irradiado es la piel, aparece el enrojecimiento (eritema) de la misma o quemaduras de mayor o menor gravedad

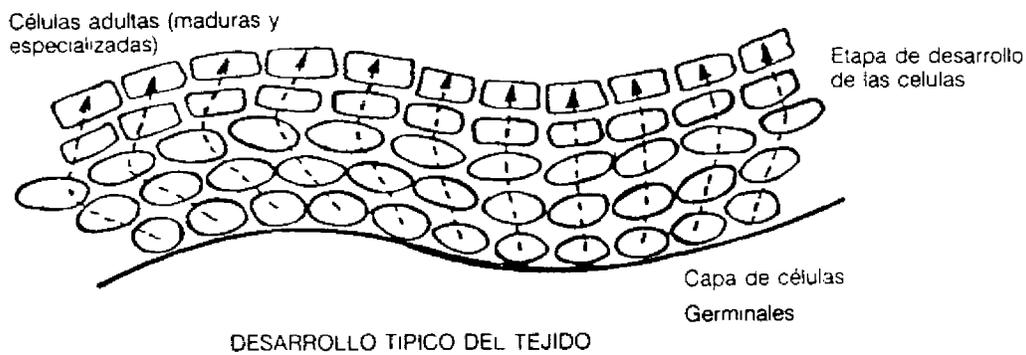


FIGURA 43

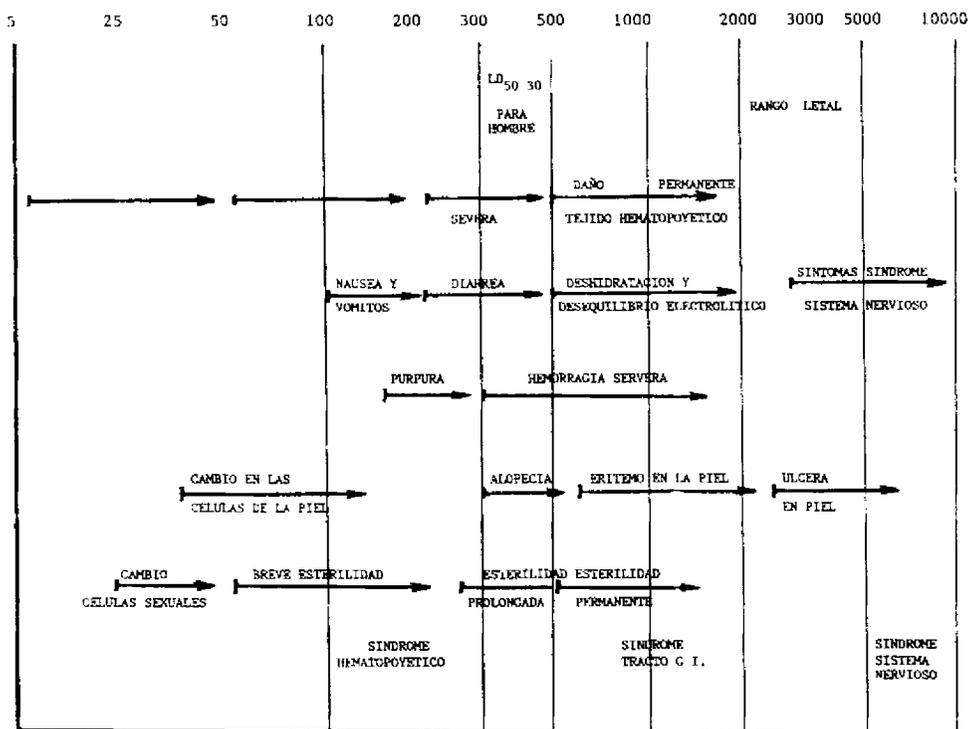


FIGURA 44

DOSIS AGUDA A TODO EL CUERPO (Rd)

EFFECTOS DIFERIDOS DE LA RADIACION

Los efectos diferidos o tardíos de las radiaciones son básicamente dos, el cáncer y los efectos genéticos.

Los efectos tardíos de la radiación no pueden ser tan claramente identificados y relacionados con la dosis de radiación, como lo son los efectos agudos, por las siguientes razones:

1. Los efectos tardíos tienen un período latente largo y variable, el cual tiende a oscurecer la relación causa-efecto.

También deben transcurrir muchos años antes de que pueda obtenerse una información significativa, como es el caso de los pintores de esferas con Radio y de los supervivientes de la bomba atómica. En el caso de los efectos genéticos, el período latente puede ser de varias generaciones.

2. La frecuencia de aparición de efectos tardíos tiende a ser muy pequeña y, para estudiar estos efectos con algún grado de significación estadística, se requiere un grupo de sujetos expuestos extremadamente grande, ya sea un estudio sobre personas o sobre animales. En el caso de los supervivientes japoneses de la bomba atómica, cerca de 20.000 personas han sido estudiadas en un período de veinticinco años.

3. Otro problema asociado con la baja frecuencia de aparición de efectos tardíos es que la mayoría de los estudios sobre personas son de sujetos que recibieron una gran exposición aislada a todo el cuerpo o a parte de él (generalmente 1 Gy (100 rad) o más) Incluso después, los efectos tardíos observados fueron pequeños en magnitud. La cuestión de efectos tardíos resultantes de dosis relativamente bajas o de la acumulación de dosis a lo largo de la vida, tal como un trabajador de la industria nuclear, está todavía indeterminada.

4. Muchos de los estudios de los efectos tardíos, proceden de estudios sobre animales. Los resultados de estos estudios han suscitado muchas preguntas con relación a la extrapolación de estos efectos al hombre. En el caso de cataratas, no aparece correlación entre el efecto en las ratas y en el hombre.

Aunque la magnitud de los efectos tardíos es extremadamente pequeña, comparada con los efectos agudos, su existencia no puede ser olvidada cuando se aplica a grandes poblaciones y se considera posible para bajas dosis de radiación (figura 45).

RIESGOS DEBIDOS A LA RADIACION

El factor de riesgo (probabilidad de producción de un efecto sobre un individuo en función de la dosis que reciba) por la radiación ya ha sido comentado en el punto anterior. En este apartado se van a presentar unas consideraciones de la relación dosis-efecto y los factores de riesgo de mortalidad por cáncer o de producción de efectos genéticos importantes debidos a la Comisión Internacional de Protección Radiológica (C I P R).

Teniendo en cuenta que, con fines de protección, no debe considerarse la posibilidad de inducción de efectos biológicos no estocásticos, la C. I. P. R. ha realizado un amplio estudio de los conocimientos adquiridos, mediante la investigación animal y la experiencia humana, con respecto a la inducción de efectos estocásticos.

A partir de dicho estudio se ha determinado que la relación dosis-efecto responde, en general, a una curva sigmoide, que puede representarse mediante la expresión:

$$E = aD + bD^2$$

INCIDENCIA ACTUAL SOBRE LA POBLACION EN GENERAL POR MILLON DE NACIMIENTOS		EFECTO DE UN GRAY POR GENERACION Y POR MILLON DE NACIMIENTOS		
		EN LA % EN 1. ^a TOTAL GENERACION		
12.500	Mutaciones dominantes y recesivas	1.500	12	10.000
3.400	Alteraciones cromosómicas	240	7	400
90.000	Otras enfermedades hereditarias	450	0,5	4.500

EFFECTOS HEREDITARIOS:

Los efectos hereditarios se encuentran moderadamente extendidos, pero las dosis adicionales pueden aumentar su incidencia. El diagrama muestra la incidencia presente de los defectos graves en la población en general (incluidos los efectos de la radiación de origen natural), así como el número adicional de casos que el UNSCEAR estima produciría un gray adicional de radiación suministrado a una generación, tanto en los hijos de las personas como en las sucesivas generaciones, de continuar el mismo nivel de exposición. Las cifras representan el número de niños nacidos con defectos graves por millón de nacimientos.

FIGURA 45.

donde E representa el efecto biológico, D la dosis equivalente total y a y b son constantes, cuyo valor relativo varía de una observación a otra. El término lineal (aD), y la pendiente que representa, a, corresponde a dosis y tasas de dosis pequeñas. El término cuadrático (bD^2) corresponde a dosis absorbidas altas. Considerando que todavía no se dispone de una información completa respecto a la relación dosis-efecto, que el valor de dicha relación se ha obtenido, en general, por extrapolación de los resultados obtenidos para dosis altas y que, por tanto y especialmente para dosis bajas de radiación, se necesita mucha investigación adicional, la C. I. P. R. ha considerado necesario asumir, para sus fines, ciertos supuestos simplificadores de la relación dirigidos a la determinación del riesgo en las instalaciones donde las dosis de radiación que pueden recibirse tienen un orden de magnitud análogo al de los límites establecidos, es decir, a los que se recibirán en el supuesto de la correcta aplicación de las normativas y medidas de protección.

Se considera una división entre los efectos de la radiación en dos tipos, los llamados efectos estocásticos, o que se producen al azar (cáncer, efectos hereditarios), y los no estocásticos que se producen con una dosis umbral (es el síndrome de irradiación aguda, el eritema)

Estos supuestos, con respecto a los efectos estocásticos, son los siguientes:

- Existe una relación lineal entre la dosis y la probabilidad de que se produzca un efecto.
- La medida del riesgo para cada persona es proporcional, en consecuencia a la suma de las dosis recibidas por cada tejido u órgano.
- El valor de la dosis equivalente colectiva puede considerarse como un índice del detrimento para la salud de la población.

Consecuencia de lo expuesto y ante la realidad de que la relación dosis-efecto es sigmoide, y que el riesgo añadido a causa de un incremento en la dosis absorbida depende de la pendiente de la curva en ese punto, la extrapolación lineal, para dosis pequeñas, de los resultados obtenidos experimentalmente para dosis altas, dará lugar a una sobreestimación del riesgo, lo cual, desde el punto de vista de la protección, no es ningún inconveniente grave, en todo caso supondrá un incremento de la misma. Ahora bien, a este respecto, conviene tener en cuenta siempre que la sobreestimación de los riesgos de la irradiación puede dar lugar a la elección de alternativas que sean más peligrosas, por otras causas, que las que implican la exposición a las radiaciones ionizantes, y que, por lo tanto, las estimaciones de los riesgos derivados de la irradiación deben utilizarse con gran precaución y con la idea de que los valores obtenidos significarán el valor máximo ocasionable por la causa analizada.