

RADIATIVIDAD Y MEDIO AMBIENTE

JOSE GUILLERMO SANCHEZ LEON

INTRODUCCIÓN

En los medios de comunicación frecuentemente aparecen noticias que hacen referencia a la radiactividad y al medio ambiente y, sin embargo, lo que es la radiactividad y cómo influye ésta sobre el medio ambiente suele ser poco conocido, incluso por personas de formación científica.

En la ponencia haremos una breve descripción de las fuentes de radiactividad, sus efectos y sus riesgos. Nos hemos basado fundamentalmente en el último Informe del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) por ser ésta, posiblemente, la fuente más solvente que existe al estar elaborado por científicos de todo el mundo especializados en esta materia.

Con el fin de facilitar la comprensión de esta ponencia por personas poco familiarizadas con temas relacionados con la radiactividad, haremos un resumen de los conceptos, magnitudes y unidades más utilizadas en la misma.

Magnitudes y unidades radiológicas

Es un hecho ampliamente conocido que existen en la naturaleza, y generados artificialmente, un gran número (más de 2.000) de nucleidos inestables (radionucleidos) que, a través de procesos de transformación (*radiactividad*) más o menos largos (dependiendo del radionucleido, puede variar de fraccio-

nes de segundo a miles de millones de años), se transmutan en otros elementos que a su vez se desintegran en otros —llamados descendientes o hijos— hasta que finalmente se llega a un nucleido estable. En la figura 1 se muestra, como ejemplo, la cadena de desintegración del U-238, que es la serie de origen natural más importante. Cada desintegración generalmente implica la emisión de partículas alfa o beta y radiación gamma. En algunos radionucleidos también se producen emisiones de neutrones o protones e incluso otros tipos de emisiones más extrañas. Estas emisiones tienen suficiente energía como para causar ionización. En el caso de las partículas alfa el poder de ionización es alto, pero el alcance es pequeño (un papel o muy pocos cm de aire es suficiente para detenerlas). Las partículas beta ionizan menos que las alfa, pero pueden penetrar más, alrededor de un metro en el aire. Las emisiones gamma son ondas electromagnéticas, como la luz visible pero de longitud de onda menor, que cubren un amplio espectro de energías y poseen gran poder de penetración (varios metros en el aire). Los rayos X son similares a las emisiones gamma, pero de energía más baja.

Estas radiaciones ionizantes pueden alcanzar a los seres vivos y ser absorbidas por éstos. La energía absorbida puede afectar a los procesos biológicos que, dependiendo de numerosos factores, pueden ir desde causar efectos claramente perniciosos (malformaciones genéticas y algunos tipos de cánceres) a efectos positivos en algunos casos (la contribución de la radiactividad a la evolución ha sido importante, pasando por la ausencia de efectos significativos).

La unidad con la que se mide la radiactividad o actividad es el becquerel (Bq)¹, que equivale a una transformación nuclear por segundo. La unidad con la que se mide la energía absorbida por unidad de masa de tejido o dosis absorbida es el Gray² (Gy), que equivale a un julio por kilogramo. El efecto biológico potencial o dosis equivalente se mide en sievert³ (Sv), que equivale a un julio por kilogramo ponderado por el riesgo biológico potencial; por ejemplo, la radiación alfa, a igualdad de energía depositada que la radiación gamma, causa un riesgo biológico unas 20 veces mayor.

La radiación no causa el mismo efecto en todas las partes del cuerpo, sino que unos órganos son más radiosensibles que otros; por ejemplo, una determinada dosis recibida sobre las manos posee un riesgo menor que la misma dosis recibida sobre los órganos reproductores. Para tener en cuenta este hecho, las diferentes partes del cuerpo tienen un factor de ponderación distinto que

multiplicado por la dosis equivalente origina la dosis equivalente efectiva, que también se mide en sieverts. Cuando se utiliza el término «dosis» sin ningún añadido, generalmente se refiere a dosis equivalente efectiva.

Hasta ahora hemos tratado las dosis individuales. Si sumamos las dosis individuales recibidas por un grupo de personas tenemos la dosis equivalente efectiva colectiva o dosis colectiva, que se expresa en Sv-persona. De todas las unidades anteriores se utilizan los múltiplos y submúltiplos habituales, especialmente el milisievert y el microsievert ($1\text{mSv} = 10^{-3}\text{Sv}$ y $1\mu\text{Sv} = 10^{-6}\text{Sv}$). Las radiaciones en la mayoría de los radionucleidos decaen lentamente, pudiendo permanecer en el medio mucho tiempo; por ejemplo, restos de radionucleidos procedentes de explosiones nucleares en la atmósfera efectuadas en la década de los cincuenta aún persisten en ésta, causando una dosis a la población actual. Para tener en cuenta este hecho, se utiliza la dosis equivalente efectiva colectiva o dosis comprometida, que es la dosis colectiva que afectará a la población mientras persistan los efectos del radionucleido en el medio ambiente (nótese que esta definición tiene en cuenta las generaciones presentes y futuras).

Después de tantas definiciones surge una primera pregunta: ¿qué dosis puede considerarse admisible para un individuo? A esta pregunta resulta difícil responder, es como preguntarse qué cantidad de un compuesto químico determinado puede ingerirse o emitirse al ambiente sin riesgo. La respuesta no puede ser un valor concreto, lo más lógico es evitar la exposición a radiaciones y sustancias nocivas. Esto no siempre es posible y mucho menos si uno no está dispuesto a renunciar a los beneficios que de su uso se puedan obtener. En el caso de las radiaciones, la exposición a las mismas es sencillamente imposible. La Tierra y el Cosmos son fuentes de radiación e incluso nuestros propios cuerpos contienen sustancias radiactivas. No obstante, además de la radiación natural, el hombre, desde mediados del presente siglo, se ha convertido en un productor de sustancias radiactivas generadas artificialmente que en sí mismas son indistinguibles de los radisótopos naturales, pero que constituyen un añadido a las ya existentes. Con el fin de establecer un control sobre estas actividades es necesario, entre otras cosas, definir límites admisibles.

FUENTES NATURALES DE RADIACIÓN

Desde que el hombre existe sobre la Tierra ha estado expuesto a las radiaciones ionizantes. Estas radiaciones llegan a los seres vivos por distintos caminos: desde el exterior (p. ej., rayos cósmicos, irradiación gamma y beta procedentes de radionucleidos existentes en la atmósfera y en la superficie terres-

1 También se emplea el curio (Ci), $1\text{Ci} = 3.7 \cdot 10^{10}\text{Bq}$.

2 También se emplea el rad, $100\text{rad} = 1\text{Gy}$.

3 También se utiliza el rem, $100\text{rem} = 1\text{Sv}$.

te) y desde el interior del propio cuerpo, al penetrar en éste radionucleidos, al inhalar e ingerir sustancias radiactivas y por la propia presencia de éstas entre los componentes de la materia orgánica.

TABLA 1
DOSIS MEDIA ANUAL, EN MSV, POR PERSONA
PROCEDENTE DE FUENTES NATURALES

FUENTES DE IRRADIACION	EXTERNA	INTERNA	TOTAL
Rayos cósmicos:			
Ionización directa	0,30	—	0,30
Neutrones	0,055	—	0,055
Radionucleidos cosmogénicos	—	0,015	0,015
Radionucleidos primordiales:			
Potasio-40	0,15	0,18	0,33
Rubidio-87	—	0,006	0,006
Serie del U-238	0,1	1,24	1,34
Serie del Th-232	0,16	0,18	0,34
Total	0,8	1,6	2,4

En la tabla 1 se muestra la dosis media que recibimos los seres humanos procedentes de la radiación natural. Se observa que el valor medio es 2,4 mSv, éste varía sustancialmente de unos lugares a otros e incluso en un mismo lugar depende de las costumbres de cada individuo. Para entender esto analizaremos brevemente las principales fuentes naturales de irradiación.

Rayos cósmicos y radionucleidos cosmogénicos

Los rayos cósmicos proceden de distintos fenómenos físicos que tienen lugar en nuestra galaxia y en el propio Sol. Esta radiación llega directamente a la superficie terrestre e indirectamente por productos resultantes de la interacción de estos rayos con los átomos de la atmósfera. Esta radiación llega a todos los individuos, pero varía de unas partes a otras. Los Polos reciben un flujo mayor que las zonas ecuatoriales debido al campo magnético terrestre;

la irradiación aumenta con la altura al disminuir la protección de la atmósfera (p. ej., a nivel del mar la tasa de dosis es 0,03 μ Sv/h, y a 2.000 m, 0,1 μ Sv/h, es decir 30 veces mayor); un viaje Madrid-Nueva York en avión implica una dosis de 50 μ Sv. Se estima que la dosis colectiva anual que recibe la población mundial como consecuencia de los viajes en avión es de 2.000 Sv-persona).

Radiación externa terrestre

Las principales fuentes de irradiación eterna terrestre son el potasio-40, el rubidio-87 y, especialmente, las series naturales del Uranio-238 y el torio-232. Los minerales que contienen estos radisótopos no están distribuidos de forma homogénea por la naturaleza, por lo que la dosis de la población varía de unos lugares a otros; no obstante, el 95 % de la población vive en zonas donde la dosis anual, de este origen, oscila entre 0,3 y 0,6 mSv, aunque hay sitios donde estos valores varían sustancialmente. Por ejemplo, en Pocos de Calza (Brasil) existe una colina con índices de irradiación externa de 250 mSv/año (800 veces superior a la media de irradiación externa de origen terrestre); aunque quizás el lugar de mayor interés, de cara a estudios epidemiológicos por el gran número de personas, es una franja existente en la costa sudoccidental de la India, donde viven 70.000 personas sometidas a una dosis media de 3,7 mSv/año (más de 10 veces superior a la media). En la cara opuesta, por sus bajas dosis, están las islas Carolinas, donde la dosis de origen natural es muy inferior a la media.

Radiación interna

La mayor dosis de irradiación que recibimos procede de la inhalación e ingestión de sustancias radiactivas de origen terrestre, excepto una pequeña parte que procede del carbono-14 y el tritio, que son cosmogénicos. La mayoría de estas sustancias radiactivas son productos de la desintegración del U-238 y, en menor medida, del Th-232. Es especialmente significativa la acumulación del plomo-210 y del polonio-210 en los mariscos. Las personas degustadoras de estos especímenes reciben una dosis superior a la media.

A la dosis interna, en pequeña cantidad, contribuye la ingestión de productos que contienen potasio, al estar compuesto por un isótopo radiactivo: el potasio-40.

Teniendo en cuenta todas las fuentes naturales de irradiación interna éstas suponen una media del 65 % de la dosis de origen natural. De esta cantidad

buena parte procede del radón, que por su interés lo tratamos en un apartado específico.

El radón

El radón es un gas noble unas siete veces y media más pesado que el aire. Está presente en la atmósfera, especialmente en sitios cerrados y poco ventilados. En la Naturaleza existen dos isótopos del radón: Rn-222, que es un producto de desintegración de la serie del U-238 (ver fig. 1), y el Rn-220 de la serie de torio-232. El más importante, con mucho, es el Rn-222. En lo que sigue nos referiremos genéricamente al «radón», entendiendo por tal el Rn-222, el Rn-220 y sus productos de desintegración (descendientes); realmente cuando se habla de los efectos del radón suele referirse a sus descendientes.

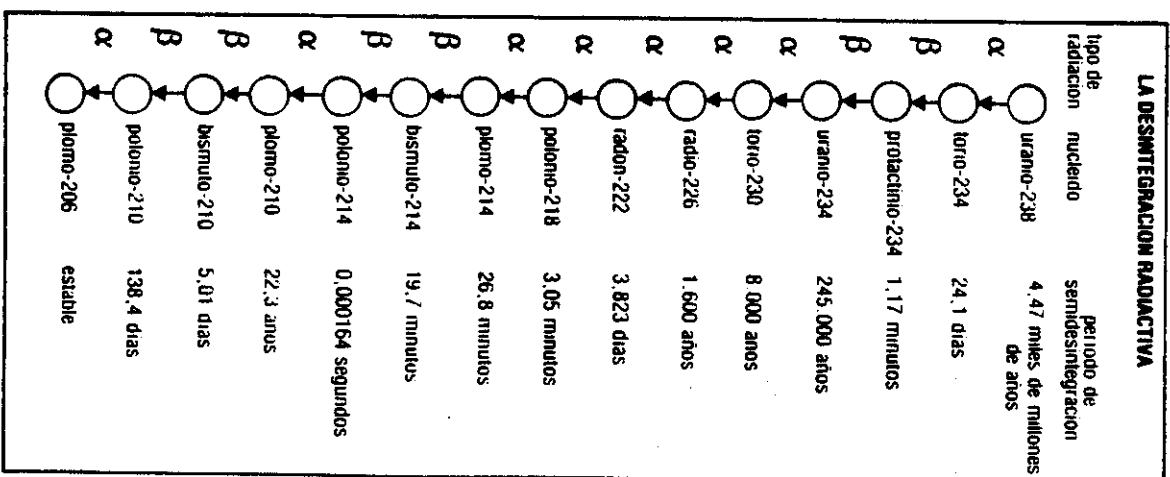
El radón se introduce continuamente a la atmósfera desde la superficie terrestre. Curiosamente la concentración del radón aumenta en el interior de las viviendas y otros lugares cerrados. En climas como el nuestro, donde las viviendas no suelen estar muy aireadas, la concentración de radón en el interior de éstas suele ser de cinco a diez veces mayor que en el exterior. Sobre esto tienen una influencia enorme los materiales de construcción utilizados y el diseño de la ventilación. Se ha ido tomando cada vez más conciencia de la importancia de este problema, hasta el punto que la CEE ha emitido una recomendación⁴ sobre la construcción de viviendas. Es paradójico que medidas de ahorro energético basadas en aislamiento de viviendas traigan consigo un aumento de la radiactividad en el interior de éstas; por ej., una habitación con un caudal de renovación de aire de 0,3 renovaciones por hora (rph) puede originar una concentración de radón aproximadamente el triple que una vivienda con 0,8 rph.

En promedio, se estima que el radón contribuye en unas tres cuartas partes de las dosis de origen terrestre recibidas por el hombre.

Otras fuentes

Existen otras fuentes de origen natural que, en menor medida que las hasta ahora descritas, también hay que tener en cuenta: el carbón quemado en las centrales térmicas, calderas de calefacción, etc., contiene carbono-14, que es

FIGURA 1



4. Recomendación 90/143/Euratom.

emitido al ambiente; la energía geotérmica arrastra radisótopos hacia el exterior; los fosfatos usados como fertilizantes suelen contener radisótopos de la serie del uranio-238, pues generalmente están asociados a zonas ricas en uranio. La lista puede continuarse pero, a escala planetaria, la contribución de otras fuentes naturales no es importante.

FUENTES ARTIFICIALES

El hombre, en el siglo presente, ha «aprendido» a crear radisótopos y a construir aparatos generadores de radiación ionizante, como son los equipos de rayos X, sincrotrones, etc. El uso de estas fuentes de radiación es muy variado: radioterapia, radioinmunoensayos (RIA), exploraciones médicas, generación de energía eléctrica, detectores de incendio, inspección de soldaduras y hasta como armas de destrucción masiva.

Todo ello ha contribuido a aumentar la radiactividad existente en la Naturaleza, aunque globalmente el aumento de dosis de la población mundial no ha sido muy elevada.

No cabe duda de que la forma en que la radiactividad, y más concretamente la energía nuclear, se dio a conocer al gran público (las explosiones nucleares sobre Hiroshima y Nagasaki) han dado a este tema una fuerte dosis emocional que dificulta un análisis estrictamente técnico y científico. Intentaremos superar esta barrera. Para ello seguiremos utilizando exclusivamente los datos y opiniones expresados en el UNSCEAR-88. A continuación describiremos las fuentes de radiación artificial más importantes.

Explosiones nucleares

Entre 1952 y 1963 se efectuaron un gran número de explosiones nucleares en la atmósfera que suponen una dosis comprometida de $3,10^7$ Sv-persona (recordemos que en este valor se incluyen las dosis ya recibidas por la población y las que se espera que en el futuro reciba). Esto es equivalente a tener expuesta la población mundial a la radiactividad natural durante tres años. En la fecha actual esto supone una dosis de 0,01 mSv/año, que equivale al 0,4 % de la radiactividad natural.

Con posterioridad a 1963, en la que EE.UU. y la URSS dejaron de efectuar explosiones en la atmósfera, otros países continuaron realizándolas hasta 1980.

Exposiciones médicas

La dosis colectiva, como consecuencia a exposiciones médicas, se estima entre 2 y 5×10^6 Sv-persona; de ella, 90-95 % procede de diagnósticos utilizando rayos X. En países desarrollados, donde existen buenas instalaciones de rayos X, la dosis recibida por placa es 1 mSv. En promedio, la dosis anual que las personas recibimos por esta causa se estima entre el 20 % y el 50 % de la radiación natural. Es ésta, con mucho, la vía de origen no natural que contribuye más a la dosis que anualmente recibimos.

Exposición profesional

Las personas que trabajan con sustancias radiactivas están más expuestas que el resto de la población a las radiaciones. En los inicios de la utilización de fuentes de radiaciones ionizantes hubo grupos profesionales, como los radiólogos, que por una práctica inadecuada recibieron grandes dosis. Sin embargo, los diseños y medios de protección han mejorado, y existe un control radiológico y médico más preciso sobre las personas profesionalmente expuestas.

La dosis comprometida para las personas que trabajan en la industria nuclear se estima en 12 Sv por GW/año. En el caso de los trabajadores de la medicina, la dosis media anual se estima entre 0,1 y 3 mSv por trabajador, y una dosis colectiva de 1 Sv-persona por millón de personas en países desarrollados.

Producción de energía eléctrica de origen nuclear

En el mundo están en funcionamiento actualmente 430 reactores nucleares, con una capacidad instalada de unos 300 gigawatts (GW). La dosis comprometida por GW se muestra en la tabla 2. La dosis estimada por persona y año se estima en 0,15 μ Sv, que equivale al 0,01 % de la dosis recibida por origen natural.

TABLA 2
DOSIS COMPROMETIDA EN SV-PERSONA
POR GW DE ENERGIA ELECTRICA
DE ORIGEN NUCLEAR

	PROXIMOS PROXIMOS	
	100 AÑOS	10 000 AÑOS
Estériles de minería (radón)	1.5	150
Nucleidos dispersados y residuos	6	60
Exposición local y regional	4	4
Exposición profesional	12	12
Total	24	230

Exposiciones accidentales

Los accidentes directamente relacionados con el uso de las radiaciones ionizantes comparados con otros tipos de accidentes han sido escasos. Sin embargo, su repercusión pública ha sido considerable, especialmente en los dos únicos accidentes realmente importantes acontecidos en la industria nuclear civil: en concreto nos referimos al accidente que inutilizó uno de los dos reactores de la central nuclear de Three Miles Island (EE.UU. 1979) y a la destrucción de uno de los cuatro reactores de la central nuclear de Chernobyl (URSS 1986). En el primero de estos accidentes no hubo emisiones radiactivas importantes ni tuvo consecuencias sobre las personas, aunque sí económicas, al quedar totalmente inutilizable uno de los reactores y no ser autorizado a funcionar el otro. El ocurrido en Chernobyl ha sido, con mucho, el accidente más importante ocurrido en la industria nuclear. A sus consecuencias nos referiremos más adelante. Con anterioridad a estos accidentes el más importante ocurrido en un reactor de uso militar tuvo lugar en Windscale (Gran Bretaña 1957), en el que se emitió una importante cantidad de radisótopos. Aparte de estos accidentes ha habido otros, especialmente en la industria militar; alguno de ellos se originaron como consecuencia de la liberación de sustancias radiactivas a la atmósfera procedentes de ensayos con explosivos nucleares; otros se debieron al hundimiento de submarinos nucleares, a la caída de satélites y aviones⁵. Cuando hubo personas irradiadas, su número no fue elevado.

⁵ El más importante de este tipo tuvo lugar en Pakomares (Almería 1966), al estrellarse un avión con cuatro bombas termonucleares.

Desde 1982 hasta 1988, el informe UNSCEAR-88 menciona los siguientes accidentes como los más importantes ocurridos en este período:

1983.—En un reactor de investigación en Constituyentes (Argentina), una persona resultó altamente irradiada (entre 5 y 10 Gy de radiación gamma y de 14 a 17 Gy de neutrones), a causa de la cual muere.

1983.—En Ciudad Juárez (México), una fuente de Co-60 es indebidamente eliminada y accidentalmente pasa a formar parte de un embarque de chatarra que se utilizó en la elaboración de acero. Fueron irradiadas unas 400 personas, 10 de las cuales recibieron dosis de 1 a 3 Gy. No se registraron muertes.

1984.—En Mohammia (Marruecos), una persona recoge una fuente de Iridio-192, utilizada para inspeccionar soldaduras, que había caído de un contenedor y se la lleva a su casa. Una familia entera, de ocho personas, fallecen por sobreexposición (se estima que recibieron entre 8 y 25 Gy).

1986.—En un acelerador lineal, en Texas (EE.UU.), dos personas resultan muertas por exposición aguda.

1986.—En Chernobyl (URSS), una explosión en un reactor, debida a una reacción química a alta temperatura entre el grafito y el agua, libera una importante cantidad de sustancias radiactivas a la atmósfera. Dos personas resultaron inmediatamente muertas por la explosión. En las operaciones de emergencia 145 personas, pertenecientes al equipo de emergencia, resultan con irradiación aguda; 28 de ellas perecieron en los tres meses siguientes al accidente y algunas más han muerto desde entonces. Los radionucleidos emitidos se dispersaron de forma muy irregular por la parte occidental de la Unión Soviética y por varias naciones de Europa. De ellos, especialmente, el I-131, Cs-134 y Cs-137 causaron exposiciones de baja intensidad en las poblaciones afectadas.

El Comité de las Naciones Unidas, que investigó las consecuencias de estas emisiones, ha llegado a las siguientes conclusiones:

Las dosis medias por habitante en los países más afectados durante el primer año se muestran en la figura 2.

Las dosis comprometidas para las generaciones presentes y futuras se muestran en la figura 3; en total se calcula la dosis comprometida en 600 000 Sv-persona. El 30 % de esta cifra se recibió el primer año y la mayoría de lo que resta se recibirá durante los treinta años siguientes al accidente: de ello el 40 % corresponde a la URSS; el 57 %, a Europa, y el 4 % restante, al resto del hemisferio septentrional.

FIGURA 2
DOSIS COMPROMETIDA A CAUSA DE CHERNOBYL
 Promedio por país en el primer año

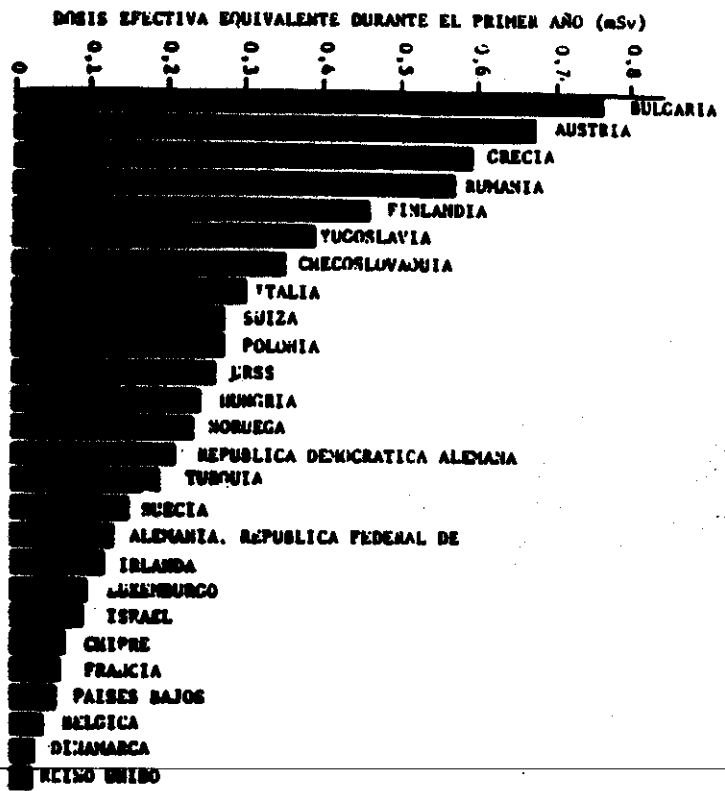


FIGURA 3
DOSIS COMPROMETIDA A CAUSA DE CHERNOBYL
 Promedio total por región

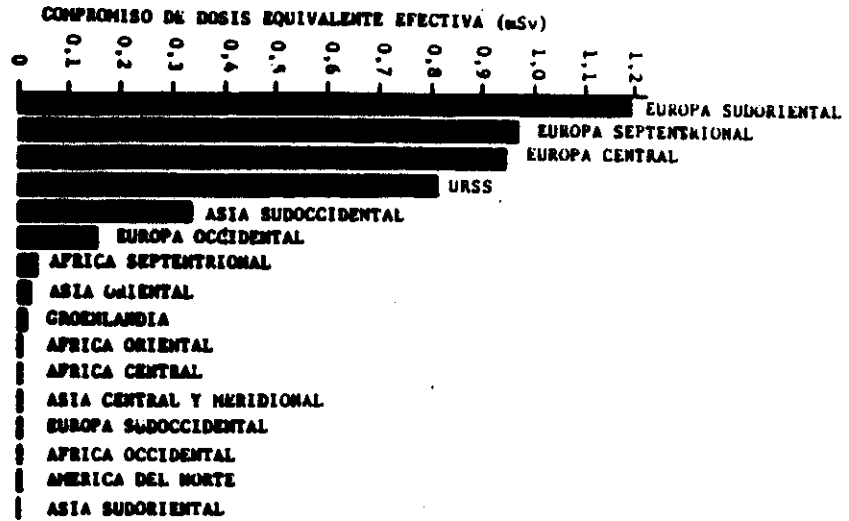


TABLA 3
DOSIS RECIBIDAS POR LA POBLACION MUNDIAL
CONSIDERANDO LAS FUENTES DE EXPOSICION

FUENTE	DOSIS ANUALES POR PERSONA EN MSV		DOSIS COMPROMETIDA	
	POR PERSONA	RANGO TIPICO	SV-10 PERSONA	ANOS DE FONDO
ANUAL				
Radiación natural	2.4	1-5	11	1
Exposiciones médicas	0.4-1	0.1-10	2-5	0.2-0.5
Exposición ocupacional	0.002	0.5-5	0.01	0.001
Producción de energía nuclear	0.0002	0.001-0.1	0.001	0.0001 (0.03)*
INDIVIDUAL				
Restos de explosiones nucleares ...	0.01	0.01	5	0.5
Accidentes nucleares	—	—	0.6	—
EN TOTAL				

* Dosis comprometidas a largo plazo debidas al Rn y al C-14 procedente de la producción de energía nuclear y al C-14 procedente de los ensayos con bombas nucleares.

EFFECTOS DE LA RADIACION SOBRE LAS PERSONAS

Hasta ahora hemos visto cuantitativamente cuáles son las fuentes de exposición a la radiación. Como elemento para comparar el riesgo hemos utilizado términos relativos, fundamentalmente la relación entre las dosis procedentes de cualquier fuente con respecto a la de origen natural. En este apartado vamos a describir cuáles son los efectos biológicos en función de la dosis recibida. Aunque el conocimiento que de ello se tiene es insuficiente, especialmente para las bajas dosis de radiación, es muy superior al que se tiene de los efectos de otros mecanismos de contaminación; por ejemplo, todo el mundo sabe que el tabaco es muy nocivo; sin embargo, aún no existe una unidad, equivalente

Para poder valorar estas dosis recuérdese que la dosis media mundial por persona es 2,4 mSv/año y 70 mSv en treinta años (p. ej., en Bulgaria, que fue el país más afectado, se recibió el primer año una dosis del 30 % superior a la radiación de origen natural, y en Europa Sudoriental, la región más afectada, se recibirán en los próximos treinta años una dosis equivalente al 1,7 % de la de origen natural).

En un estudio realizado por especialistas de varios países para las Naciones Unidas se llega a la conclusión de que en la zona afectada por Chernobyl no ha habido aumento de la tasa de mortalidad en los últimos cinco años. Este estudio ha encontrado una fuerte contestación por los grupos antinucleares.

1987. — El Goiania, Brasil, 240 personas resultaron contaminadas, de las que fallecieron cuatro, al adornarse con polvo blanco procedente de una fuente de Cs-137, que había sido desmontada por error.

MISCELÁNEO DE LAS DOSIS ESTIMADAS PARA TODAS LAS FUENTES DE RADIACION

En la tabla 3 se resumen las dosis estimadas para las fuentes de radiación más importantes. Se observa que la mayoría de las radiaciones que recibimos las personas es de procedencia natural, seguida de las exposiciones médicas y continuada muy de lejos por otras fuentes.

Naturalmente estas dosis no están homogéneamente repartidas por la superficie terrestre, sino que varía ampliamente en función de factores muy diversos.

al Sv, que permita cuantificar su efecto biológico en función de los cigarrillos fumados; lo mismo puede decirse para cualquier sustancia que tenga efectos nocivos. En este sentido, el conocimiento que de las radiaciones se tiene es muy superior al de otros mecanismos de contaminación. En el cuadro I se describe esquemáticamente el proceso de actuación de las radiaciones desde que penetran en los tejidos hasta que causan efectos biológicos en los mismos.

CUADRO I
EFFECTOS DE LAS RADIACIONES SOBRE LOS TEJIDOS

IONIZACION	Partículas cargadas interactúan con los electrones de los átomos; algunos de los electrones son desprendidos y los átomos quedan ionizados.
TRANSFORMACIONES FÍSICO-QUÍMICAS	Los átomos ionizados y los electrones libres son muy inestables; se crean nuevas moléculas, particularmente por contener radicales libres. Estos radicales libres interactúan entre ellos pudiendo originar cambios moleculares que afectan al comportamiento biológico de las células.
EFFECTOS BIOLÓGICOS	Algunos de los cambios biológicos pueden tener consecuencias sobre el comportamiento celular y después de una serie de transformaciones, que duran de segundos a años, manifestarse en forma de cáncer o efectos genéticos. Es obvio que no todas las transformaciones tienen consecuencias fatales, en la mayoría de los casos los organismos consiguen, a través de mecanismos de reparación molecular y celular, evitar que estas transformaciones celulares prosperen.

Efectos estocásticos y no estocásticos

Las radiaciones ionizantes pueden causar efectos nocivos sobre los seres vivos. Cuando las dosis son altas — por encima de 500 mSv, es decir 200 veces superior a la media de la radiactividad de origen natural — estos efectos son

seguros, o como en radiobiología se dice, sus efectos son no estocásticos y aparecen en horas o en pocos días. Las situaciones en que los seres humanos se han visto expuestos a estas dosis, si exceptuamos las bombas sobre Hiroshima y Nagasaki y los tratamientos médicos, han sido escasos; en el propio accidente de Chernobyl sólo unas decenas de personas excedieron estas dosis. A estos niveles de dosis los efectos inmediatos pueden predecirse con exactitud (ver cuadro II), si bien no todos los seres humanos tenemos comportamientos biológicos idénticos frente a la radiaciones. Cuando se dan estadísticas, como el cuadro II, de causa-efecto, generalmente se refieren a relaciones válidas para el 50% de la población.

CUADRO II
EFFECTOS AGUDOS POR ALTAS DOSIS

DOSIS (Grays)	EFFECTOS
100	Fallecimiento por lesiones en el sistema nervioso central en horas o pocos días.
10-50	Muerte por lesiones gastrointestinales en una o dos semanas.
3-5	50% de fallecimientos por lesiones en la médula ósea entre uno y dos meses.
0.5-1	Alta probabilidad de supervivencia. Si afecta al cristalino produce opacidad.
0.1	Estilidad temporal, si esta dosis afecta a los testículos.

En los casos en los que los niveles de dosis son bajos, generalmente por debajo de 500 mSv, no es seguro que se produzca efecto alguno, sino que tienen cierta probabilidad de aparecer: se trata de efectos estocásticos. Estos efectos, cuando aparecen, tardan años e incluso, cuando se trata de efectos

genéticos, pueden transcurrir varias generaciones hasta que se manifiestan, aunque lo más probable es que sólo afecten a una escasa proporción de la población. En definitiva, cuando una persona recibe una pequeña dosis de radiación es muy improbable que esté condenada, ni su descendencia, a sufrir un efecto nocivo.

TABLA 4
RIESGOS ESTIMADOS EN FUNCION DE LA DOSIS RECIBIDAS

TEJIDO U ORGANNO	RIESGO Sv	EFFECTO ESPERADO	RIESGO RELATIVO
Gónadas	4.0.10 ⁻⁴	Malformaciones genéticas para 2 generaciones	0.25
Pecho	2.5.10 ⁻⁴	Cáncer	0.15
Médula	2.0.10 ⁻⁴	Leucemia	0.12
Pulmón	2.0.10 ⁻⁴	Cáncer	0.12
Tiroides	5.0.10 ⁻⁴	Cáncer	0.03
Superficie ósea	5.0.10 ⁻⁴	Osteosaroma	0.03
Resto	5.0.10 ⁻⁴	Cáncer	0.3
Total	1.65.10⁻⁴	Algunos individuos	1

El UNSCEAR ha realizado una valoración de estos riesgos, que se muestran en la tabla 4. Estos valores, en opinión del propio UNSCEAR, están elaborados con criterios muy conservadores y lo más probable es que los efectos para bajas dosis estén sobrestimados; no obstante, una reevaluación de los efectos causados por las bombas de Hiroshima y Nagasaki —realizada recientemente por el Comité Americano para Investigar el Efecto de las Radiaciones (Informe BEIR V)— ha llegado a la conclusión de que en el caso de exposiciones agudas los efectos cancerígenos y genéticos se prolongan en el tiempo más de lo que hasta ahora se creía, en cuyo caso para altas dosis la tabla 4 subestima algunos riesgos, si bien se sigue manteniendo la opinión general de que para bajas dosis, que son a las que incluso los individuos que trabajan con radiaciones están expuestos, los límites de la tabla 4 sobrestiman en riesgo.

Otro de los criterios que se aplican en radiobiología es considerar que la relación riesgo-efecto, como la de la tabla 4, es lineal, es decir que a doble

dosis, doble probabilidad de que se produzca un efecto determinado. Una consecuencia de esta interpretación es que el efecto es el mismo si se recibe una determinada dosis en un tiempo muy breve o en un período largo; esto es una interpretación muy conservadora. La opinión general es que la relación entre la dosis y la probabilidad de que se produzca un determinado efecto es lineal-cuadrática, siendo más probable que se produzca un efecto si la dosis se recibe en un instante que si se hace de forma fraccionada en un período largo; diversas experiencias de laboratorio en animales y plantas así lo corroboran. No obstante, no existen datos precisos para establecer los coeficientes de la relación lineal-cuadrática, así que por ahora la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR) y el UNSCEAR han decidido mantener la interpretación lineal, a sabiendas de que lo más probable es que para muy bajas dosis se estén sobrestimando sus efectos. Naturalmente no todo el mundo está de acuerdo con esta interpretación y hay quien sostiene opiniones contrarias e incluso quien defiende que muy bajas dosis pueden tener efectos positivos. Se ha llegado a celebrar un congreso donde se presentaron varios estudios epidemiológicos para analizar esta hipótesis. Lo más razonable es aplicar la interpretación lineal. Como ejemplo de aplicación de ésta vamos a realizar una valoración de las consecuencias del accidente de Chernobyl: de acuerdo con la tabla 4, el riesgo de que aparezcan efectos diferentes es de 10^{-5} por mSv, es decir que por cada mSv recibido por cada individuo en una población de 100.000 habitantes uno de ellos padecerá un cáncer por esta causa o su descendencia tendrá un daño genético grave; en el caso de Chernobyl se ha estimado una dosis comprometida para un período de unos treinta años en 300.000 Sv que, de acuerdo con la relación indicada, implicarán para Europa unos 3.000 cánceres o malformaciones congénitas graves, que equivale al 0,025 % de los cánceres que en el mismo período y región se producirán a consecuencia del consumo del tabaco —que los OMS estima en 400.000 por año en Europa—. Por otra parte, si tomamos como referencia la figura 3, vemos que la población de Europa Sudoriental, a causa del accidente de Chernobyl, recibirá 1,2 mSv y 70 mSv de origen natural; es decir, el número de cánceres y malformaciones congénitas será 1,7 % superior al que se producirán como consecuencia de la radiación natural.

Límites de dosis y de actividad

Las legislaciones de los diferentes países establecen límites a las prácticas que impliquen el uso de radiaciones ionizantes. Estos límites se basan en las directrices de la CIPR y, en el caso de emisiones al medio ambiente. En el caso de España se suelen aplicar límites basados en la Agencia Americana

del Medio Ambiente (EPA) y en la Comisión Reguladora Nuclear (CFR). La CEE está emitiendo directrices que tienden a homogeneizar las normas europeas relativas al uso de las radiaciones ionizantes.

En España se aplican los límites del Reglamento de Protección Sanitaria Contra las Radiaciones Ionizantes (RPSCRI), que establece una dosis máxima de 50 mSv al año para el personal profesionalmente expuesto, 5 mSv al año para el público en general y 1 mSv para las mujeres embarazadas durante el período de gestación. Es importante aclarar que estos límites deben aplicarse conjuntamente con el criterio ALARA (tan bajo como razonablemente sea posible), que básicamente consiste en reducir la exposición a las radiaciones a las mínimas cantidades que un estudio riesgo-beneficio justifique. Aunque existe una metodología que permitiría aplicar este criterio de manera rigurosa, no suele hacerse, pues para ello se requiere la cuantificación de algunos parámetros, tales como el coste de un Sv. En su defecto a las emisiones de sustancias radiactivas se suelen aplicar límites específicos mucho más rigurosos de los que la legislación establece con carácter general. Por ejemplo, el límite de dosis máximo admisible establecido por la legislación española, en el Reglamento de Protección Sanitaria contra las Radiaciones ionizantes, para el público en general es 5 mSv, mientras que el límite de dosis que se admite para las instalaciones nucleares es 0,25 mSv/año al individuo más expuesto (que equivale al 10% de la dosis de origen natural), que en la práctica suele ser muy inferior a esta cifra.

CONCLUSIÓN

El Hombre, desde su aparición sobre la Tierra, ha vivido dentro de un ambiente radiactivo. Desde principios de este siglo se ha convertido a su vez en un productor de radiaciones. No obstante, las fuentes de radiación artificial contribuyen en menor medida a la dosis media de la población mundial que las de origen natural. Entre las fuentes artificiales, la que más contribuye a la dosis es el empleo de rayos X, y otras fuentes de radiación en Medicina.

En el Mundo existen más de 430 reactores nucleares en funcionamiento que en los países más desarrollados generan parte de la energía eléctrica (en España el 40 % de la electricidad es de origen nuclear). Estas instalaciones, en operación normal, son más limpias que las otras fuentes convencionales de producción de electricidad, sin embargo existe un temor entre la población a posibles accidentes.

Este temor se ha visto incrementado con el único accidente habido en la

industria nuclear civil con consecuencias serias sobre la población: el accidente de Chernobyl. Sus efectos han sido graves, pero menores a otros accidentes convencionales que, sin embargo, la opinión pública ha olvidado (p. ej., Unión Carbide, en su planta de Bhopal, India). Esto demuestra la especial sensibilidad de las personas ante la radiactividad. Ante un peligro, lo mejor que puede hacerse es conocer su alcance real, y esto es lo que se ha pretendido explicar en la ponencia; si no, se corre el riesgo de confundir molinos de viento con gigantes.

La existencia de 50.000 cabezas nucleares en el mundo capaces de destruir varias veces la población terrestre, muchas de ellas transportadas por cientos de buques y aviones que surcan los mares y el cielo de la Tierra, constituye posiblemente el problema potencialmente más grave que tiene planteado la Humanidad.