

ESTRATOS, Número de Invierno 1993

RADIATIVIDAD Y MEDIO AMBIENTE

José Guillermo Sánchez León (guillermo@usal.es)

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 como influye ésta sobre el medio ambiente suele ser poco conocido, incluso por personas de formación científica.

INTRODUCCION

Cuando nos referimos a las radiaciones, o a cualquier potencial contaminante, nos surge inmediatamente una pregunta: ¿Que cantidad de radiación podemos recibir los seres humanos para que esta nos resulte inocua?. La respuesta no puede ser un valor concreto, lo mas lógico es evitar la exposición a radiaciones y sustancias nocivas. Esto no siempre es posible y mucho menos si uno no esta 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 radioisótopos 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. El establecimiento de límites admisibles no es

especifico de las radiaciones sino que es un principio que debe aplicarse a cualquier tipo de polucionante.

La definición de los límites admisibles se establece sobre el conocimiento que se tiene sobre lo que se pretende controlar. Aunque es mucho lo que nos queda por saber sobre la radiactividad es posiblemente una de las causas potenciales de polución mejor estudiadas. Las Naciones Unidas dispone de un comite encargado de seguir la evolución que del conocimiento de la radiactividad y sus efectos se va produciendo denominado: "Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas". El último informe de este organismo es conocido como UNSCEAR-88. En este artículo haremos un breve descripción de los datos mas significativos de este informe.

RADIATIVIDAD

Es un hecho ampliamente conocido que la materia esta básicamente formada por átomos, constituidos de una parte central denominada núcleo, constituido por neutrones y protones, y una corteza, donde están los electrones que

orbitan en torno al núcleo. Las propiedades radiactivas (concepto que explicamos mas adelante) dependen exclusivamente de las características del núcleo. Los núcleos pueden ser estable o inestables. Los núcleos estables conservan "eternamente" su número de protones y neutrones (Las teorías mas modernas predicen la desintegración de los protones ,y por tanto de cualquier tipo de átomo, pero a una velocidad extremadamente pequeña que a efectos practicos nos permite referirnos a núcleos estables como aquellos de una duración prácticamente eterna). Los núcleos inestable (denominados radionucleidos) son aquellos que con el tiempo (dependiendo del radionucleido puede variar de fracciones de segundo a miles de millones de años) se transmutan en otros elementos que a su vez se pueden desintegrar en otros - llamados descendientes o hijos- hasta que finalmente se llega a un núcleo estable. En la naturaleza se conocen de origen natural o generados artificialmente, un gran número (mas de 2000) de radionucleidos. En la figura 1 se muestra, como ejemplo, la cadena de desintegración del U-238 de origen natural más importante. Esta transmutación o desintegración de un tipo de núcleo en otro se produce por la emisión de partículas α ó β y radiación γ . En algunos radionucleidos también se producen emisiones de neutrones o protones e incluso otros tipos de emisiones mas extrañas. Estas emisiones tienen suficiente energía como para causar ionización. En el caso de las partículas α 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 β ionizan menos que las α pero pueden penetrar mas, alrededor de 1 metro en el aire. Las emisiones γ son ondas electromagnéticas, como la luz visible pero de longitud de onda menor, que cubren un amplio espectro de energías poseen gran poder de penetración (varios metros en el aire). Los rayos X son similares a las emisiones γ pero de energía mas baja.

Estas radiaciones ionizantes pueden alcanzar a los seres vivos y ser absorbida 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. En el Cuadro I se resumen las magnitudes y unidades habitualmente empleadas al referirse a temas radiológicos.

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 γ y β procedentes de radionucleidos existentes en la atmósfera y en la superficie terrestre) 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.

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 substancialmente de unos lugares a otros e incluso en un mismo lugar depende de las costumbres de cada individuo. Para entender ésto analizaremos brevemente las principales fuentes naturales de irradiación.

Tabla 1.- Dosis media anual, en mSv, por persona procedente de fuentes naturales

FUENTES DE IRRADIACION	Externa	Interna	Total
Rayos C3smicos			
Ionizaci3n directa	0,30	0,30	
Neutrones	0,055	-	0,055
Radionucleidos cosmog3nicos			
	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

Radiaci3n externa terrestre.

Las principales fuentes de irradiaci3n 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 radis3topos no est3n distribuidos de forma homog3nea por la

naturaleza por lo que la dosis de la poblaci3n varía de unos lugares a otros, no obstante el 95% de la poblaci3n 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 substancialmente. Por ejemplo: en Pocos de alga (Brasil) existe una colina con índices de irradiaci3n externa de 250

mSv/año (¡800 veces superior a 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 coralinas 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 significativo 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 en media el 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 figura 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 es introducido 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 tiene una influencia enorme los materiales de construcción utilizados y el diseño de la ventilación. De éste problema se ha ido tomando cada vez más conciencia de su importancia, hasta el punto que la C.E.E. ha emitido una recomendación 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 (r.p.h) origina una concentración de radón

aproximadamente el triple que una vivienda con 0,8 r.p.h.

En media, el radón se estima que 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 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 los fosfatos 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 esta 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 dió a conocer al gran público (las explosiones nucleares sobre Hiroshima y Nagasaki) han dado a este tema de 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 describimos las fuentes de radiación artificial más importante.

Explosiones nucleares

Entre 1952 y 1963 se efectuaron un gran número de explosiones nucleares en la atmósfera que suponen una dosis comprometida de $3 \cdot 10^7$ 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 3 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 EEUU y la desaparecida URSS dejaron de efectuar explosiones en la atmósfera, otros países continuaron realizándolas hasta 1980. Francia ha venido utilizando el atolón de Mururoa en el Pacífico Sur para ensayar sus explosivos nucleares. Recientemente ha anunciado la suspensión de estos ensayos.

Exposiciones médicas

La dosis colectiva como consecuencia a exposiciones médicas se estima entre 2 y $5 \cdot 10^6$ 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 media, 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 las medidas de protección han mejorado, y existe un control radiológico y médico más estricto 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 gigawatios(GW). La dosis comprometida por GW se muestran 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.

CUADRO I

Magnitudes y unidades radiológicas

La unidad con la que se mide la radiactividad o actividad es el Bequerelio (Bq) que equivale a una transformación nuclear por segundo. La unidad con la que se mide la energía absorbida por unidad de masa de tejido ó dosis absorbida es el Gray (Gy) que equivale a 1 julio por kilogramo. El efecto biológico potencial o dosis equivalente se mide en Sievert (Sv) que equivale a 1 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 mas 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 decae 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 (notese que esta definición tiene en cuenta las generaciones presentes y futuras).

Tabla 2 Dosis comprometida en Sv-persona por GW de energía nuclear

	Próximos 100 años	Próximos 10.000 años
Estériles de minería (radon)	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 que 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 (EEUU 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 si 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 mas 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. A parte de estos accidentes ha habido otros, especialmente en la industria militar, alguno de ellos se originaron como consecuencia de la liberación de substancias radiactivas a la atmósfera procedentes de ensayos con explosivos nucleares, otros se debieron al hundimiento de submarinos nucleares, a la caída de satélites y aviones¹. Cuando hubo personas irradiadas su número no fue elevado.

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

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

1983.-En Ciudad Juarez (Méjico), una fuente de Co-60 es indebidamente eliminada y accidentalmente pasa a formar parte de un empaque 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 8 personas fallecen por sobreexposición (se estima que recibieron entre 8 y 25 Gy).

1986.- En un acelerador lineal, en Texas (EEUU), dos personas resultan muertos 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 persona resultaron inmediatamente muertas por la explosión. En las operaciones de emergencia 145 personas pertenecientes al equipo de emergencia resultan con irradiación aguda, 28 de ellos 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 siguiente conclusion: 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 30 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.

Para poder valorar estas dosis recuerdese que la dosis media mundial por persona es 2,4 mSv/año y 70 mSv en 30 años (por ejemplo: en Bulgaria, que fue el país mas afectado, se recibió el primer año una dosis el 30% superior a la radiación de origen natural y en Europa

Sudoriental, la región mas afectada, se recibirán en los próximos 30 años una dosis equivalente al 1,7% la de origen natural).

1987.-En Goiania, Brasil, 240 resultaron contaminadas, de las que fallecieron cuatro, al adornarse con polvo brillante procedente de fuente de Cs-137 que habia sido desmontada por error.

Con posterioridad a 1987 no ha habido accidentes graves. Quizás merezca destacar el ocurrido en un hospital de Zaragoza por un mantenimiento defectuoso de un acelerador de electrones.

MISCELÁNEO DE LAS DOSIS ESTIMADAS PARA TODAS LAS FUENTES DE RADIACIÓN.

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

EFFECTOS DE LA RADIACIÓN SOBRE LAS PERSONAS

Hasta ahora hemos visto cuantitativamente cuales 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 respecto a la de origen natural. En este apartado vamos a describir cuales 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 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 III se escribe esquemáticamente el proceso de actuación de las radiaciones desde que penetran en los tejidos hasta que causan efectos biológicos en los mismos.

Efectos estocásticos y no estocásticos (o deterministas)

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 ó deterministas 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 solo unas decenas de personas excedieron estas dosis. A estos niveles de dosis los efectos inmediatos pueden predecirse con exactitud (ver Cuadro VI), si bien no todos los seres humanos tenemos comportamientos biológicos idénticos frente a la radiaciones. Cuando se dan cuadros, como el Cuadro IV, de causa-efecto, generalmente, se refieren a relaciones validas para el 50% de la población. En los casos en los que los niveles de dosis son bajas, generalmente por debajo de 500 mSv, los efectos de las radiaciones no es seguro que se produzcan 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 mas 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 este condenada, ni su descendencia, a sufrir un efecto nocivo.

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 mas probable es que los efectos para bajas dosis estén sobreestimados, no obstante una revaluación 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 es que para bajas dosis, que son a las que incluso los individuos que trabajan con radiaciones están expuestos, los límites de la tabla 4 sobreestiman el 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 sobreestimando sus efectos. De acuerdo con la tabla 4 el riesgo de

que aparezcan efectos diferidos 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.

CUADRO III

Efectos de las radiaciones sobre los tejidos.

Ionización: 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 reactivas por contener radicales libres. Estos radicales libres interactúan entre ellos pudiendo originar cambios moleculares que afecten al comportamiento biológico de las células.

Efectos biológicos: Algunos de los cambios biológicos pueden tener consecuencias importantes 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

CUADRO IV
Efectos agudos por altas dosis.

DOSIS(Grays)	EFEECTO
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 osea entre uno y dos meses
0,5-1	Alta probabilidad de supervivencia. Si afecta al cristalino produce opacidad.
0,1	Esterilidad temporal, si esta dosis afecta a los testículos.

Tabla 4 Riesgos estimados en función de la dosis recibidas

Tejido u órgano	Riesgo Sv ⁻¹	Efecto esperado	Riesgo relativo
Gónadas	$4,0 \times 10^{-3}$	Malformaciones genéticas para 2 generaciones	0,25
Pecho	$2,5 \times 10^{-3}$	Cáncer	0,15
Médula	$2,0 \times 10^{-3}$	Leucemia	0,12
Pulmón	$2,0 \times 10^{-3}$	Cáncer	0,12
Tiroides	$5,0 \times 10^{-4}$	Cáncer	0,03
Superficie osea	$5,0 \times 10^{-4}$	Osteosoma	0,03
Resto	$5,0 \times 10^{-3}$	Cáncer	0,3
TOTAL	$1,65 \times 10^{-2}$	Algunos individuos	1

Límites de dosis y de actividad.

Las legislaciones de los diferentes países establecen límites a las practicas que impliquen el uso de radiaciones ionizantes. Estos límites se suelen basar 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 esta 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 suele 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.

Lo más práctico que podemos hacer cuando veamos una cifra referente a un valor de dosis recibida por una persona es compararla con la que en media se recibe de origen natural. Recordemos que este valor es 2,4 mSv al año,

y que variaciones del 20% ó 30% en torno a esta cifra son frecuentes en la naturaleza.

CONCLUSIONES

Los seres humanos, desde su aparición sobre la Tierra, viven dentro de un ambiente radiactivo. La radiactividad varía mucho de unos lugares a otros e incluso de los hábitos de cada persona. El Hombre, desde principios de siglo se ha convertido a su vez en un productor de radiaciones con diversos fines.

En la figura 2 se resumen las proporciones en las que contribuyen las distintas fuentes de radiación ionizante. Es conveniente aclarar que se trata de valores medios y así deben entenderse.

Los efectos de las radiaciones están bastante mejor estudiados que el de otros agentes potencialmente polucionantes, no obstante entre la población la palabra radiactividad sigue creando inquietud. Tal vez eso se deba a que los seres humanos no tenemos sentidos para detectarla y debemos recurrir a instrumentos artificiales para medirla. De los aspectos relativos a las radiaciones el que más llama la atención es el referido al uso de la energía nuclear. A esto ha contribuido el que en su origen esté relacionada con sus aplicaciones bélicas. Los accidentes nucleares, especialmente el de Chernobyl, ha potenciado esta sensación de temor en la población. Sus efectos han sido graves pero llama la atención que otros accidentes de igual o superior magnitud (p. ej. La fuga de un agente tóxico que produjo miles de muertos y afectados, en una planta química en Bhopal -India- en la

misma época que Chernobyl ha sido prácticamente olvidado por el público) causan un impacto mucho menor.

Lo único que cabe hacerse para poder valorar mejor los hechos de cualquier tipo es conocerlos, sino se corre el riesgo de equivocarse molinos de vientos con gigantes, y viceversa.

En este artículo deseamos haber contribuido en algo a mejorar el conocimiento que los lectores de esta revista tienen sobre el fenómeno radiactividad.

1. ⁱEl más importante de este tipo tuvo lugar en Palomares (Almería 1966) al estrellarse un avión con cuatro bombas termonucleares.