

LA RADIATIVIDAD

Rafael Núñez-Lagos Roglá*†

Física Atómica, Molecular y Nuclear. Facultad de Ciencias

Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza

En 1921 madame Curie, la científica más respetada de su tiempo y probablemente de todo el siglo XX, ganadora de dos Premios Nobel, uno de Física y otro de Química, viajó a los Estados Unidos. Allí recibió del presidente Harding el regalo de un gramo de radio, comprado por suscripción pública por las mujeres norteamericanas, para que lo trajese a Europa y pudiera utilizarse en tratamientos médicos. El donativo representaba la quincuagésima parte de la cantidad total de radio producida hasta entonces en los Estados Unidos, y su valor ascendía a 100 000 dólares de la época. En la caja de madera y plomo que lo contenía podía leerse una inscripción que decía “Ofrecido por el presidente de los Estados Unidos, en representación de las mujeres americanas, a María Skłodowska Curie, en reconocimiento a sus trascendentales servicios a la ciencia y a la humanidad por el descubrimiento del radio”.

¿Se podría hoy hacer y decir lo mismo? ¿Cree nuestra sociedad que la radiactividad está prestando trascendentales servicios a la humanidad? Probablemente, el temor y la creencia de que la radiactividad es algo dañino predominarían en la respuesta social. Sin embargo, no era ignorancia lo que había en tiempos antiguos. El conocimiento de los daños que puede causar la radiactividad, mal utilizada, es muy temprano, y la producción de eritemas en la piel y quemaduras producidas por rayos X es anterior a los comienzos del siglo XX. Lo que sucedió es que pronto se pudo constatar que las virtudes de las radiaciones eran muy superiores a sus peligros y que éstos podían evitarse con las debidas precauciones. La importancia de la radiactividad y en particular del radio para aplicaciones médicas se vio muy pronto, y ya en 1902 se había descubierto el efecto que la radiación del radio producía sobre las células cancerosas. La radiactividad se consideró un bien para la humanidad, y esta creencia se mantuvo durante toda la primera mitad del siglo XX.

*Académico numerario

†Extraído de la Lección Inaugural del Curso Académico MMIV-MMV de la Universidad de Zaragoza

La segunda guerra mundial fue, sin duda, el factor determinante de la actual postura de la sociedad ante el fenómeno nuclear. El miedo a las armas nucleares, que, sin embargo, ha evitado una tercera conflagración mundial, y su asociación, intencionadamente provocada, con cualquier fenómeno relacionado con lo radiactivo o nuclear están en el origen del cambio de opinión. Una falsedad reiteradamente repetida termina por ser creída. Todo lo radiactivo es malo podría ser, en el escueto lenguaje publicitario, la frase que resumiese el pensamiento o creencia de muchas personas de nuestra sociedad actual. Entre ellas se encontrarían seguramente algunas a las que se les ha curado un tumor gracias a la radiación, y es evidente que prácticamente a todas se les habrá hecho más de una radiografía.

Tal postura se mantiene por múltiples causas. Una de ellas podría ser la intangibilidad del fenómeno: la radiactividad no se siente, ninguno de nuestros sentidos es capaz de detectarla. Otra podría ser el desconocimiento de lo que es la radiactividad y de sus posibles consecuencias. Y una tercera sería el uso intencionado de esa ignorancia para fines ajenos a la ciencia, por lo general poco claros.

Hay que tener en cuenta que para la mayor parte de la sociedad desarrollada vivimos en un mundo que podríamos considerar casi mágico. Estamos rodeados de aparatos tecnológicamente sofisticados y casi nadie tiene idea de cómo y por qué funcionan, y lo que es peor: no hay el menor interés en saberlo. Las personas consideradas cultas tienen que conocer las grandes obras de la literatura y el arte y a sus autores, pero pueden ignorar por completo las grandes obras de la ciencia y la tecnología, y no digamos a sus autores. Por ejemplo, es muy probable que casi nadie sepa quién o quiénes inventaron el transistor, que obviamente ha influido en el devenir de la humanidad más que la obra pictórica o literaria que ustedes puedan pensar. La ciencia no se considera cultura, y se deja en un coto aparte para su cultivo por una minoría vocacional. Sin embargo, la ciencia y la tecnología han invadido por completo nuestra vida cotidiana. En un ambiente social de este tipo es muy fácil provocar el temor y la desconfianza colectiva hacia equipos, aparatos o productos de funcionamiento desconocido y cuyos efectos no se sienten de forma directa o inmediata, como pueden ser, por ejemplo, las antenas de telefonía, la radiactividad o los alimentos transgénicos.

Por cierto, el transistor fue desarrollado por William Shokley, junto con John Bardeen y Walter Brattain en los laboratorios Bell, en los Estados Unidos, en 1947. Los tres recibieron por ello el Premio Nobel de Física en 1956. Bardeen recibió un segundo Premio Nobel en Física de 1972 por la teoría de la superconductividad.

A pesar de esta opinión poco positiva, las aplicaciones y usos de la radiactividad han seguido creciendo de día en día. Las aplicaciones médicas tanto en terapia como en diagnóstico son ya habituales en casi todos los grandes hospitales del planeta. El

número de isótopos radiactivos puestos a disposición de los profesionales de la medicina, la ciencia y la industria sigue creciendo, al igual que los equipos productores y detectores de radiaciones ionizantes. En la industria, la radiactividad se utiliza en el control del espesor del papel y de los niveles de líquidos, lo mismo que en la producción de energía eléctrica en las centrales nucleares, así como en la radiografía industrial, el análisis de suelos, los altos hornos, etc. Las aplicaciones y usos en la investigación científica la hacen indispensable desde su uso como trazador molecular hasta la investigación del mundo subnuclear.

En España contamos hoy día con nada menos que casi 20 000 instalaciones radiactivas, de las que en Aragón tenemos 647. El ritmo de crecimiento de estas actividades ha sido el último año de 364 nuevas instalaciones. Por lo que respecta a las instalaciones nucleares, en España tenemos tres del ciclo nuclear, dedicadas a la producción de elementos combustibles, concentrados de uranio y almacenamiento de residuos de media y baja actividad, y siete centrales nucleares con nueve reactores. Su producción en el último año ha sido de algo más de 63 000 gigavatios/hora, con un precio muy inferior al de cualquier otro sistema de producción eléctrica y sin emisión de CO₂. Esto supone aproximadamente la tercera parte de la electricidad que hemos consumido. Un gigavatio/hora es un millón de kilovatios hora. En el mundo, hay actualmente en funcionamiento 440 reactores nucleares de producción eléctrica, y, a pesar del llamado parón nuclear, se hallan en construcción 33 nuevas centrales y están previstas otras 69. Nuestros vecinos franceses tienen 59 reactores, que producen el 78 % de la energía que consumen en Francia.

Como ven ustedes, el mundo de la radiactividad es muy dinámico y abarca una amplia gama de actividades humanas. Respecto a la cuestión de si el uso de la radiactividad es realmente beneficioso o perjudicial, espero que ustedes puedan establecer su propia conclusión cuando termine esta disertación.

Hace poco más de cien años, Henry Becquerel descubrió la radiactividad cuando trabajaba con sales de uranio. Noten ustedes que fue un descubrimiento, no una invención. La radiactividad es un fenómeno natural; está ahí, existe independientemente de la acción humana y se encuentra extendida prácticamente por todos los lugares de nuestro planeta. Esto constituye lo que hoy se denomina *radiactividad natural*. El hombre ha sido capaz de producir elementos radiactivos, aunque todos ellos existieron en nuestro planeta y con el devenir del tiempo se han extinguido. Dichos elementos forman la *radiactividad artificial*. Se llama *radiactividad ambiental* la que se encuentra en el ambiente, por tanto, la que nos afecta de una manera inevitable y directa. Como veremos más adelante, es de ambos tipos, tanto natural como artificial.

La radiactividad no es más que la emisión espontánea de partículas por los núcleos atómicos. El concepto de *partícula* engloba también lo que se conoce más comúnmente

como *radiación*, que no es más que radiación electromagnética, puesto que se absorbe y se emite como fotones. Cada desintegración de un núcleo se acompaña de la emisión de varias partículas.

He afirmado que la radiactividad se encuentra prácticamente en todos los lugares de la Tierra. Nada más alejado de los supuestos peligros de la radiactividad que la sala donde nos encontramos en este momento. Veamos a título de ejemplo lo que está ocurriendo aquí, ahora, en tan sólo un segundo.

En este breve tiempo en cada uno de nosotros se desintegran unos 4000 núcleos de K^{40} , que se encuentra, por ejemplo, en la sal común y el agua del mar. Lo hace también un número similar de núcleos de C^{14} , que forma parte del aire que respiramos y, por tanto, del carbono de las moléculas de nuestro organismo. Estos dos isótopos, junto con otros elementos radiactivos que existen en nuestro organismo y que incorporamos en la ingestión de alimentos y en la respiración, como, por ejemplo, uranio y torio, elevan la cuenta a un total de unas 10 000 desintegraciones por segundo.

Ustedes son fuentes radiactivas, y las trescientas personas que estamos en la sala habremos contribuido a la radiactividad natural ambiental en una hora con unos doscientos sesenta mil millones (260 000 000 000) de desintegraciones; y tengan ustedes en cuenta que en cada desintegración se emite más de una partícula.

Pero los seres humanos no somos los únicos que estamos emitiendo partículas al medio ambiente, porque los materiales que nos rodean también son radiactivos. Los bancos de madera, las paredes (tanto los ladrillos como el hormigón y el yeso), los vestidos que llevamos, las pinturas, etc., todos los materiales son en mayor o menor grado radiactivos. El aire que respiramos, además del C^{14} ya mencionado, tiene Rn^{222} . Este isótopo es un gas noble de la familia del U^{238} , radiactivo emisor alfa, cuyos descendientes, sólidos, se fijan en los pulmones. No crean que la historia termina aquí, porque, además de la radiactividad terrestre, recibimos también radiación del exterior. Del universo nos viene la radiación cósmica, que atraviesa la atmósfera generando a su paso nuevos elementos radiactivos, entre ellos el ya mencionado C^{14} , y llega a la superficie terrestre bañándonos con unas 240 partículas por metro cuadrado y por segundo, lo que significa que unas 30 partículas por segundo nos atraviesan a cada uno de nosotros, sin contar los neutrinos, que prácticamente no interaccionan. En la montaña la radiación cósmica es más intensa que a nivel del mar, y si viajan ustedes en avión, se incrementa notablemente. De hecho, el personal de vuelo se considera profesionalmente expuesto a la radiación debido a esta radiación cósmica “extra”. Si pusiésemos en marcha un detector, contaría miles de cuentas, que es lo que constituye el fondo radiactivo ambiental del lugar.

A pesar de que vivimos en un ambiente radiactivo, su nivel de radiactividad no nos produce ningún efecto nocivo, lo que nos indica que la radiactividad no es, en principio,

tan peligrosa como a primera vista mucha gente pudiera pensar. Con la radiactividad ocurre lo mismo que con los alimentos y otros miles de productos con los que estamos en contacto en nuestra actividad diaria. Es la dosis la que define un umbral entre lo beneficioso y lo perjudicial. Analicemos con un poco más de detalle en qué consiste el fenómeno de la radiactividad, por qué se produce, qué consecuencias puede tener y cuáles son esas dosis.

La radiactividad es un proceso nuclear mediante el cual núcleos que son inestables se transforman en otros más estables hasta alcanzar la estabilidad. Hasta 1932, en que Chadwick descubrió el neutrón, no se supo que los núcleos atómicos estaban constituidos por dos tipos de partículas, protones y neutrones. Ambas son muy similares, casi idénticas; solamente difieren en su carga eléctrica: el protón es positivo y el neutrón es neutro. El número de protones de un núcleo determina el elemento químico de que se trata. Conocemos hoy día algo más de cien elementos químicos, y algo más de mil núcleos. Cada elemento químico puede tener varios núcleos distintos, que varían en el número de neutrones y, por tanto, en su masa y que reciben el nombre de *isótopos*. Hay elementos que tienen más de diez isótopos. Casi todos los elementos químicos tienen uno o dos isótopos estables, pero no todos: algunos, como el tecnecio, que es elemento 43, y todos los elementos posteriores al plomo, elemento 82, no tienen ninguno, son radiactivos. En total, existen 284 núcleos estables o cuasiestables.

Cuando se estudió la naturaleza de las partículas que emitían los núcleos radiactivos, se encontraron tres tipos distintos, que se denominaron *alfa*, *beta* y *gamma*. La radiactividad alfa es la emisión por un núcleo de lo que se llamó una partícula alfa, que resultó ser un núcleo de He^4 . Este núcleo es uno de los más estables de la naturaleza y está formado por dos protones y dos neutrones. La radiactividad alfa transmuta el núcleo emisor en otro elemento químico que tiene dos protones menos, es decir, salta dos lugares hacia la izquierda en la tabla periódica. Casi todos los núcleos posteriores al plomo son emisores alfa. La radiactividad beta transforma un neutrón en un protón, emitiendo además un electrón y un antineutrino. La emisión beta también transmuta el elemento químico, creando otro con un protón más, es decir, salta un lugar a la derecha. Prácticamente todos los elementos de la tabla periódica tienen isótopos que son emisores beta. Por último, la radiación gamma es la emisión de un fotón, y no conlleva la transmutación del elemento sino un reajuste de los protones o neutrones del núcleo para pasar a un estado de menor energía y, por tanto, más estable. Esta emisión suele acompañar a los procesos alfa y beta.

Irene Curie y su esposo Frédéric Joliot produjeron por primera vez en 1934 radiactividad artificial al fabricar un núcleo de P^{30} al bombardear Al^{27} con partículas alfa. El P^{30} es radiactivo, no existe actualmente sobre la Tierra y se desintegra con un período

de unos tres minutos, emitiendo un electrón positivo, en vez de negativo, y un neutrino, en lugar de un antineutrino. Este proceso, en cierto modo inverso al beta, en el que es un protón el que se convierte en un neutrón, se denomina *beta positivo* o *beta más*. El matrimonio Joliot- Curie recibió por este descubrimiento el Premio Nobel de Química en 1935.

La magnitud que mide la radiactividad se conoce como *actividad*, que no es más que el número de núcleos que se desintegran por unidad de tiempo. No es el número de partículas que una sustancia emite, pues ya hemos mencionado que son varias las partículas que se emiten en cada desintegración. La unidad de actividad es el becquerelio (en honor a Henry Becquerel, su descubridor), que es una desintegración por segundo. Una persona tiene, por tanto, una actividad de unos 10 000 becquerelios. En muchas ocasiones se habla de la *actividad específica*, que es la que tiene una determinada cantidad de materia. Una persona de 70 kg tendría una actividad específica de unos 143 Bq/kg (becquerelios por kilogramo). El becquerelio es una unidad muy pequeña, por lo que se emplean normalmente sus múltiplos.

La actividad de un isótopo radiactivo no es constante, disminuye con el tiempo. Es imposible saber cuándo se va a desintegrar un núcleo radiactivo determinado, y no existe forma alguna de activar o ralentizar el proceso. Lo que sí es una constante específica de cada núcleo es la probabilidad de que se desintegre en un intervalo de tiempo. Se llama *período* al tiempo necesario para que el número de núcleos radiactivos de una sustancia se reduzca a la mitad. El período es una constante para cada isótopo radiactivo, y es inalterable bajo todas las condiciones imaginables, incluidas, por ejemplo, las de los núcleos estelares. Entre los mil núcleos existe una amplísima gama de períodos, desde inferiores a la millonésima de segundo hasta los 10^{16} años (diez mil billones de años), es decir, más de dos millones de veces la edad de la Tierra. A efectos prácticos, estos núcleos se pueden considerar estables. Cuanto menor es el período de un isótopo, mayor es su actividad, puesto que el ritmo de desintegraciones tiene que ser mayor. Se puede considerar prácticamente extinguido un isótopo cuando han transcurrido más de diez períodos. Por ejemplo, el conocido Co^{60} , usado en radioterapia, tiene un período de 5,27 años; por tanto, en poco más de medio siglo, a contar desde el momento de su fabricación, se podría considerar extinguida una fuente de cobalto.

¿De dónde proceden los núcleos radiactivos existentes hoy día en la Tierra? La causa de la variedad de elementos químicos de que gozamos, pues en la Tierra se encuentran todos los elementos químicos estables y un buen número de radiactivos, se debe a nuestro origen. La hipótesis más aceptada, si bien no unánimemente, es que el lugar del Sol estuvo ocupado por otra estrella, más masiva, que se convirtió en supernova. Una *supernova* es el acto final de la vida de una estrella que tenga una masa de varias masas solares. Nuestro

Sol tuvo que nacer de una supernova de tipo II, análoga a la más recientemente estudiada, conocida como SN1987A, pues las de tipo I no contienen hidrógeno. La estrella original estaba compuesta esencialmente por hidrógeno, y durante millones de años lo utilizó para formar helio, en un proceso de fusión en que cada cuatro núcleos de hidrógeno forman uno de helio liberando energía. Nuestro Sol utiliza este mismo mecanismo para generar su energía, y en la Tierra se busca poder efectuar un proceso similar, controlado, como panacea de la producción energética. Prácticamente, el 90 % de la vida de la estrella transcurre utilizando este mecanismo. Cuando el hidrógeno del núcleo central se ha consumido, cesa la producción de energía y la gravedad se convierte en fuerza dominante. El núcleo se contrae y se calienta y, consecuentemente, las capas exteriores de la estrella se expanden. Éste será el fin de nuestro planeta, pues el Sol se expandirá, dentro de unos 4000 millones de años, hasta alcanzar la órbita de Marte convirtiéndose en una estrella gigante roja. Cuando el núcleo alcanza la densidad y la temperatura suficiente, comienza la fusión del helio dando origen a carbono y oxígeno. La estrella adquiere una estructura de capas con un núcleo denso y caliente, rodeado exteriormente por una capa de helio, que a su vez está rodeada por otra capa de hidrógeno. En este estadio la estrella puede perder una parte de su envoltura exterior, formando una gran nube de gas, fundamentalmente hidrógeno y helio. Cuando la temperatura de la estrella no puede mantener el resto de la envoltura, comienza a contraerse y a caer sobre el interior. La estrella se hace mucho más pequeña y se calienta en el exterior, pasando de roja a azul, con una temperatura en su superficie de unos 20 000 grados.

El Sol tiene, actualmente, unos 6000 grados. El núcleo, denso y caliente, comienza a formar neón, sodio y magnesio. El proceso se acelera y cada ciclo tiene una duración mucho más corta que el anterior. El progreso tan rápido se debe a la extraordinaria producción de rayos X y gamma, que tiene lugar cuando el núcleo alcanza, con el quemado del carbono, unos 500 millones de grados. Finalmente, se forman el silicio y el azufre, que dan origen al hierro, elemento en que acaba la fusión nuclear exoenergética. Una vez que el núcleo de hierro alcanza su masa crítica de una vez y media la masa solar y su diámetro es aproximadamente la mitad que el terrestre, ocurre la catástrofe. En tan sólo unas décimas de segundo el núcleo de hierro se colapsa y en la implosión se produce una gigantesca onda de choque que expande todo el resto de la estrella, que, junto con un efecto de retroceso, produce la desintegración de todo el sistema. Durante el corto período de tiempo en que todo esto sucede se producen enormes cantidades de neutrones, que dan origen, al interaccionar con los núcleos existentes, a nuevos elementos. En este proceso de nucleosíntesis se originan todos los nucleidos posibles. La mayor parte de ellos son inestables de períodos muy cortos, y los estables y los de vida larga son los que quedan todavía en nuestro entorno. La actividad radiactiva en ese período es inimaginable, pues la

energía que hay en juego es uno o dos órdenes de magnitud superior a la que el Sol liberará en toda su existencia. En esa nube de desechos rica en todos los elementos químicos es donde se formó nuestro Sol y su sistema solar. Además de estos nucleidos originarios, la radiación cósmica y la propia radiactividad originan constantemente nuevos isótopos radiactivos.

¿Cuáles son los efectos que la radiactividad produce al incidir sobre la materia? En general, produce ionización, libera electrones de los átomos que forman las moléculas, bien ionizándolas, bien rompiendo enlaces químicos, estos electrones se mueven y pierden energía chocando con otros electrones y terminan siendo capturados. El resultado final se traduce en calor. El efecto físico es, por tanto, un depósito de energía en una región determinada. La magnitud de este depósito depende de la naturaleza de la partícula que incide, de su energía y de la naturaleza de la materia. La medida de este efecto se denomina dosis absorbida, y su unidad es la de la energía, el julio, por unidad de masa, el kilogramo. Se denomina un gray a la dosis necesaria de cualquier radiación sobre cualquier sustancia tal que deposite un julio en un kilogramo. Ésta es una unidad grande y se utilizan sus submúltiplos. Así, podemos hablar de que una sustancia ha absorbido una dosis de un miligray. Si se tratase de una persona de 70 kg de peso, la energía absorbida habría sido de un milijulio por kilo, o sea, 70 milijulios, que es una cantidad ínfima comparada con las energías que utilizamos en la vida ordinaria. Una taza de café sin azúcar nos suministra unas 280 calorías, que son 1170 julios, un millón de veces mayor que las energías que hay en juego en la radiactividad. Esta pequeñez de la energía explica lo difícil que ha sido detectarla y analizarla. Los alquimistas medievales que buscaban la transmutación no pudieron verla, y la tenían ante sus ojos. La actividad que naturalmente tenemos nos produce una dosis absorbida inferior a la millonésima de gray, y la debida a la radiactividad ambiental actual apenas alcanza unas milésimas.

Hemos mencionado que la actividad de las sustancias radiactivas disminuye con el tiempo; por lo tanto, en la Tierra primitiva la radiactividad era muy superior a la actual, y desempeñó un papel primordial en la formación de la materia orgánica y en la posterior evolución de las especies. La aparición de materia orgánica de origen biótico es muy anterior a lo que tradicionalmente se pensaba. La composición isotópica del carbono en las rocas de Isua indica que posiblemente hace ya 3800 millones de años existía una actividad fotosintética, y se han identificado restos fósiles de cierta microbiota compleja en rocas de entre 3000 y 3500 millones de años de antigüedad. También parece que en aquellos tiempos existía oxígeno en cantidades no insignificantes: esto se deduce a partir de investigaciones muy precisas de las concentraciones de uranio y torio en rocas de datación bien conocida.

El K^{40} es el isótopo que desempeña y ha desempeñado un papel más importante en el

ambiente radiactivo natural y en la vida humana. Actualmente, es tan sólo el 0,0117 % (uno con diecisiete por diez mil) del potasio natural, pero hay que tener en cuenta que este elemento es muy abundante en la naturaleza. Hay unos 10 kg de potasio en una tonelada de arenisca y 35 kg en una tonelada de granito. En el agua del mar hay 380 gramos de potasio por tonelada. La energía producida por la desintegración beta del K^{40} es la mayor contribución al calor generado por las sustancias radiactivas en la corteza terrestre, y, a lo largo de la historia de la Tierra, la contribución total a la energía suministrada a los océanos por este elemento ha sido considerable.

La composición química de los océanos se estableció probablemente hace unos 4100 millones de años, y el papel del K^{40} en el océano primitivo fue de la máxima importancia. La desintegración beta del potasio libera 0,5 MeV de energía. Como su período es de $1,28 \times 10^9$ (1280 millones) de años, su abundancia en el pasado era de 0,38 g/t, unas 10 veces mayor que la actual. Dado que el océano tiene unas 1,7 a 1018 (1,7 trillones — millones de billones—) toneladas de agua, habría unos seiscientos cincuenta mil millones de toneladas de K^{40} , que suministraron en un período, por ejemplo, de tan sólo 1000 años una energía capaz de producir la síntesis de unos mil millones de toneladas de productos radiolíticos orgánicos.

Durante 30 años se creyó que el primer reactor nuclear sobre la Tierra había sido la Pila P1, construida por Enrico Fermi en Chicago en 1942; y todavía se sigue creyendo hoy día por mucha gente que la energía de fisión es una invención humana y que no es natural. No se pensaba que fuese posible que un sistema técnica y aparentemente tan complejo como un reactor nuclear se pudiese construir por la naturaleza. Pero en 1972 se descubrieron los restos de un reactor nuclear natural de fisión en Oklo (Gabón). Un equipo francés puso de manifiesto que hace unos 2000 millones de años funcionaron allí al menos seis reactores. Se trata de zonas con una alta concentración de uranio y agua en las que tuvo lugar un proceso de reacción en cadena sostenida, al igual que en nuestros reactores nucleares actuales. En aquellos tiempos la abundancia del U^{235} era muy superior a la actual, y la criticidad se podía obtener con relativa facilidad si la concentración de uranio era suficientemente elevada. El descubrimiento causó un gran impacto y se realizaron múltiples investigaciones, e incluso se celebraron dos congresos monotemáticos organizados por el Organismo Internacional de la Energía Atómica de Viena en 1975 y en 1978. En ellos quedaron claramente establecidos los hechos ocurridos geológica, geoquímica y físicamente. Se pudo establecer la formación de los depósitos de uranio, las características que debieron reunir para que el fenómeno hubiese podido tener lugar y la energía que se liberó en el proceso.

En Oklo se han encontrado seis reactores nucleares en una veta de roca sedimentaria de un grosor comprendido entre 4 y 10 metros que contiene concentraciones de uranio

comprendidas entre el 20 % y el 60 %, mientras que la matriz que la rodea contiene solamente entre el 0,2 % y el 0,5 %. Los reactores tienen una forma lenticular de un metro de grueso y entre diez y veinte metros de largo. La reacción ocurrió hace unos 2000 millones de años y estuvieron en funcionamiento durante unos 600 000 u 800 000 años. La cantidad total de energía liberada por el fenómeno de Oklo se puede estimar bastante bien a partir del uranio consumido, y arroja la impresionante cifra de 500 millones de gigajulios, aproximadamente la producción durante un año de unas veinte plantas nucleares de última generación de una potencia de 1000 megavatios eléctricos.

El fenómeno de Oklo ha permitido, además, realizar un estudio detallado de la posible existencia de reactores nucleares de fisión en la Tierra primitiva. La época en que estos reactores pudieron ocurrir es bastante dilatada, pues se extiende desde hace unos 4100 millones de años, en que se formó la primera corteza terrestre, hasta los 1100 millones de años, en que las concentraciones por desintegración natural del U^{235} ya no son las adecuadas. Durante unos 3000 millones de años, es decir, dos terceras partes de la existencia de la Tierra, el fenómeno ha podido ocurrir. Se puede hacer una estimación del número de reactores naturales de nuestro pasado basándose en el cociente U^{235}/U^{238} , medido en distintos depósitos terrestres. Si se considera una capa de 1 km de profundidad de la corteza terrestre, se obtiene que unos 100 millones de reactores tipo Oklo han podido estar activos en el pasado. Supuesta una potencia media de 1 kW por reactor, la energía liberada resulta ser de 500 000 teravatios-año, con una vida activa de un millón de años. Esta energía supone toda la que consumiría la humanidad procedente de todas las fuentes energéticas durante unos 45 000 años al ritmo actual.

Los efectos biológicos que una determinada dosis tiene en las personas varían con la naturaleza de la radiación y se denominan *dosis equivalente*. El efecto no es el mismo si un miligray está producido por partículas alfa o por electrones, y además depende de la energía que estas partículas tengan. El efecto biológico de la dosis absorbida por las personas se mide en sieverts. Un sievert es un gray multiplicado por un factor que varía entre 1 y 20, según el tipo y la energía de las partículas. Por ejemplo, para electrones este factor es 1 y para partículas alfa es nada menos que 20, indicando que el efecto de estas últimas es veinte veces mayor. Así, una persona que recibiese una dosis de 1 gray de electrones habría recibido 1 sievert; pero si hubiesen sido partículas alfa, habrían sido 20 sieverts.

De nuevo, el sievert es una unidad grande y se utilizan sus submúltiplos. Cada uno de los órganos y tejidos de nuestro organismo puede soportar una dosis equivalente distinta, sin que se detecte efecto biológico alguno. Por ejemplo, la piel puede recibir el doble que el cuerpo en su conjunto, y las extremidades cinco veces más. Hay, por tanto, establecidas unas dosis máximas permitidas para cada órgano y también para la totalidad del cuerpo

humano, dosis que se pueden recibir en un tiempo determinado sin que se produzcan efectos nocivos de ningún tipo.

Las dosis recomendadas como máximas permisibles están en constante revisión y no hay un acuerdo universal que sea seguido por todos los países. El origen del problema reside en que los efectos de la radiación en dosis moderadas es integral durante cierto tiempo. Los efectos parecen ser los mismos si se recibe una determinada dosis durante tiempo definido que si se recibe la mitad de la dosis en el doble de tiempo, o el doble de dosis en la mitad. Pero la afirmación no es correcta en intervalos largos de tiempo y se discute su corrección cuando se trata de una dosis equivalente que no produce ningún efecto biológico detectable a corto, medio o largo plazo. Por otra parte, es difícil de asegurar que un determinado efecto se debió a una dosis recibida mucho tiempo atrás. La mayoría de los efectos que se buscan son distintos tipos de cáncer, y, dada la dificultad de saber la etiología del tumor, es muy difícil y dudosa su adscripción a una pequeña dosis de radiación recibida muchos años antes. La polémica aumenta cuando se trata de dosis muy pequeñas. La escuela de pensamiento que ha dominado hasta muy recientemente se inclina por la extrapolación a cero de la hipótesis lineal (puesta en duda desde los años setenta), que afirma que los efectos biológicos son linealmente dependientes de la dosis. A ello añaden, además, sus seguidores la hipótesis de inexistencia de un umbral mínimo (puesta seriamente en duda desde principios de los años noventa), que afirma que cualquier dosis, por pequeña que sea, es nociva. La mayor parte de los argumentos se basan en el estudio médico detallado que se ha realizado a los supervivientes de Hiroshima y Nagasaki desde el año 1945 hasta la actualidad, y su comparación con personas que no recibieron radiación. La relación entre una dosis elevada y su efecto está muy clara, pero con pequeñas dosis la situación está cambiando. Los últimos datos parecen indicar que los supervivientes que recibieron pequeñas dosis, ligeramente superiores a la natural, están teniendo mayor longevidad y han padecido menos problemas de salud que los que no recibieron nada. Lo mismo sucede con los experimentos que se han realizado con ratones alimentados con dietas en las que se ha eliminado el K^{40} , que se desarrollan poco y débilmente, situación que se soluciona si se añade de nuevo el potasio radiactivo a la dieta. Parece ser que estamos hechos para vivir en un ambiente con cierta radiactividad, que sirve para mantener activo y preparado el sistema biológico de reparación genética y celular. Éste es el segundo punto de vista que se va imponiendo lentamente en los ambientes de protección radiológica. Hoy día está apoyado además en los datos existentes sobre población ocupacional y profesionalmente expuesta, pacientes con tratamientos médicos, poblaciones que trabajaron con radio (incluidos los que fabricaban esferas luminosas de relojes), trabajadores relacionados con la industria militar (incluidos observadores de pruebas nucleares), población expuesta a alta radiación ambiental natural (habitantes de ciertas zonas, pilotos y per-

sonal de vuelo, mineros, etc.), habitantes de la región de Chernobyl, además de los ya mencionados supervivientes de Hiroshima y Nagasaki.

La dosis máxima recomendada, más común, para personal profesionalmente expuesto (que está bien controlado) es de 50 mSv/año, que puede dividirse para medirla por semanas: por ejemplo, 1 mSv/semana, o integrarse en varios años, por ejemplo, 250 mSv en cinco años. La dosis recibida en todo el cuerpo, que alcanza el 50 % de mortalidad dentro de los 30 días siguientes, supuesto que no se ha recibido ningún tratamiento médico, se admite que es de 2,5 a 3 Gy recibida en una sola irradiación. Las dosis locales que puede recibir una parte del cuerpo sin sufrir daños pueden ser mucho más elevadas y varían con el órgano o parte del cuerpo. Por ejemplo, las manos pueden recibir una dosis equivalente de 100 mSv/año y el cristalino de 500 mSv/año.

La dosis anual que recibimos de fuentes naturales es en promedio de 0,4 a 4 mSv, pero hay regiones del mundo con dosis mucho más elevadas. Por ejemplo, la playa de Guarapari, en Brasil, que triplica su población en verano, situada a 100 km de Río de Janeiro, es rica en torio, y la dosis llega fácilmente a los 175 mSv/año (casi cuatro veces la máxima permitida para personal profesional). Lo mismo sucede en el pueblo pesquero de Meaipe, con una dosis 50 veces la media. En las costas de Keirala, en la India, con más de 90 000 habitantes, las dosis alcanzan los 400 mSv/año (ocho veces la máxima permitida), y lo mismo sucede en Ramsar, en Irán, donde es superior a la máxima recomendada. En ninguno de los casos anteriores se ha detectado efecto nocivo alguno en las poblaciones ni una mayor incidencia de dolencias o enfermedades; más bien ocurre el efecto contrario.

La contribución más importante a la dosis equivalente que recibe la población es la procedente de fuentes naturales, que representa el 87 % de la total, mientras que las radiaciones artificiales contribuyen tan sólo en el 13 % restante. Entre las fuentes naturales, la más importante es el radón del aire, que, por sí solo, alcanza casi el 50 % de la dosis equivalente total, y si se le añade el torón, otro gas noble radiactivo, la sobrepasa con creces. Ya hemos mencionado que el radón es un gas noble que pertenece a la familia del U^{238} y que es emitido por los materiales de construcción y por la propia Tierra. El problema del radón se ha incrementado recientemente con los programas de ahorro energético que han aumentado el aislamiento y disminuido la ventilación de las viviendas. Este efecto se ha hecho patente en los países nórdicos y en particular en Suecia, donde el Gobierno había llevado a cabo un programa estatal de aislamiento de las viviendas para ahorrar energía. El resultado del plan ha sido excelente, pero, al estar las casas ahora bien aisladas y poco ventiladas, el radón ha aumentado en su interior a niveles que pueden resultar peligrosos y existe una seria preocupación al respecto. Nuestra radiactividad interna contribuye con algo menos del 15 % a la dosis equivalente total, casi tanto como la procedente del resto de radionucleidos naturales. La radiación cósmica contribuye con

el 10 %. Del 13 % con que contribuyen las fuentes artificiales, la gran mayoría, el 11 %, se debe a los tratamientos médicos, sobre todo radiografías. En contra de lo que se pudiera creer, las pruebas nucleares en la atmósfera, los accidentes nucleares, fundamentalmente Chernobyl, y los vertidos de las instalaciones radiactivas sólo contribuyen conjuntamente con el 0,4 % a la dosis total, al igual que las dosis procedentes del conjunto de los detectores de humos, ciertas fuentes luminosas, aparatos de televisión y los viajes aéreos. Por último, la actividad de las centrales e instalaciones nucleares repercute tan sólo en la dosis total en el 0,02 % (el dos por diez mil) y es, por tanto, a pesar de lo que muchos pretenden hacernos creer, despreciable.

¿Cómo se controla la radiactividad ambiental? En España, al igual que en todos los países occidentales, existe un organismo, el Consejo de Seguridad Nuclear, dependiente únicamente del Parlamento, a quien informa y rinde cuentas. Este Consejo es el único responsable de la seguridad nuclear y de la protección radiológica en todo el territorio nacional. A escala mundial, dependiente de las Naciones Unidas, está la Agencia Internacional de la Energía Atómica, con sede en Viena; en Europa existe dentro de la Unión Europea el Euratom, que junto con la Comunidad del Carbón y del Acero fue una de las comunidades que dieron origen a la actual Unión.

El Consejo de Seguridad Nuclear tiene establecidas en nuestro país varias redes encargadas de la medida de la radiactividad ambiental. Existe una red de estaciones automáticas, con medio centenar de estaciones repartidas por todo el territorio nacional que miden de forma continua la radiactividad global atmosférica tanto del aire como del polvo en suspensión. Sus resultados se transmiten de forma automática al Consejo en Madrid. Una segunda red formada por 28 laboratorios, en su mayoría universitarios, entre los que se encuentra el que dirijo en esta Universidad, toma muestras de forma continua y analiza en detalle la composición radiactiva del polvo atmosférico, los aerosoles y el I^{131} del aire, el depósito que cae en los suelos, el agua de lluvia y la potable, etc.; los resultados se envían periódicamente al Consejo. Además, estos laboratorios están constantemente investigando la mejora de los métodos de detección y análisis, así como los de preparación de las muestras. Los datos que se toman son contrastados por otros centros, y cada cierto tiempo se efectúan ejercicios de intercomparación, ciegos, para comprobar la precisión y la mejora de las medidas de los distintos laboratorios. El Centro de Experimentación de Obras públicas del Ministerio de Fomento se encarga de la medida de la radiactividad del agua de nuestros ríos y de nuestras costas, con más de un centenar de puntos de muestreo. Por último, alrededor de cada una de las instalaciones nucleares existentes en nuestro país hay una red que determina la radiactividad de aire, suelo, agua de ríos y potable, vegetación, animales y alimentos en toda la zona de influencia de la instalación, que abarca como mínimo un radio de 25 km. Cualquier variación significativa en cualquier

parámetro detectado por cualquier punto de cualquier red es inmediatamente detectado, estudiado y analizado. El Consejo cuenta con un conjunto de inspectores que cumplen con su misión en todas las instalaciones nucleares y radiactivas. Pueden ustedes estar tranquilos porque, por lo que respecta a la radiactividad, están muy bien vigilados.

La radiactividad ambiental que tenemos en la actualidad es prácticamente la misma que existía con anterioridad a la era nuclear. Ni las pruebas nucleares, ni los accidentes y vertidos habidos presentan ya restos apreciables. El ambiente que nos rodea podemos afirmar que, en este momento, es radiactivamente limpio. Ojalá podamos seguir afirmándolo mucho tiempo y ojalá pudiésemos afirmar lo mismo de los contaminantes ambientales no radiactivos.