



PNUMA

# RADIACIÓN

## EFFECTOS Y FUENTES

¿Qué es la radiación?  
¿Cómo nos afecta la radiación?  
¿De dónde procede la radiación?

>1 000 mSv

Dosis utilizada en radioterapia

100 mSv

Dosis de los astronautas  
(4 meses)

10 mSv

Tomografía computarizada (TC)  
del abdomen

1 mSv

Dosis de los trabajadores  
de la industria nuclear (1 año)

0,1 mSv

Radiografía de tórax o vuelo en  
avión (20 horas)

0,01 mSv

Radiografía dental

0,001 mSv

Nueces de Brasil (30 g)





PNUMA

# RADIACIÓN

## EFECTOS y FUENTES

¿Qué es la radiación?  
¿Cómo nos afecta la radiación?  
¿De dónde procede la radiación?

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

## RENUNCIA

La presente publicación se basa en gran medida en las conclusiones del Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas, un órgano subsidiario de la Asamblea General de las Naciones Unidas, para el cual el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) proporciona la secretaría. Esta publicación no representa necesariamente las opiniones del mencionado Comité Científico ni las del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Las denominaciones empleadas y la presentación del material en esta publicación no implican la expresión de opinión alguna por parte del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente sobre la condición jurídica de ningún país, territorio, ciudad o área, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

Esta publicación puede ser reproducida parcial en cualquier forma para fines educativos o sin ánimo de lucro, sin permiso del titular de los derechos de autor, a condición de que se indique la fuente. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente agradecería recibir una copia de cualquier publicación que utilice esta publicación como fuente.

La presente publicación no puede ser revendida o utilizada para cualquier otro fin comercial, sin el permiso previo, por escrito, del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente promueve prácticas ambientalmente racionales en todo el mundo y en sus propias actividades. Esta publicación fue impresa en papel reciclado 100% libre de cloro. La política de distribución del PNUMA tiene como objetivo reducir su huella de carbono.

Catalogación: Radiación: efectos y fuentes, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016

ISBN N°: 978-92-807-3599-4

Trabajo N°: DEW/2035/NA

Copyright © Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016

Versión electrónica



PNUMA

# RADIACIÓN

## EFECTOS y FUENTES

¿Qué es la radiación?  
¿Cómo nos afecta la radiación?  
¿De dónde procede la radiación?

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

## AGRADECIMIENTOS

Este folleto se basa en gran medida en las conclusiones del Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas y en la publicación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente *Radiación: dosis, efectos y riesgos*, inicialmente editado en 1985 y 1991 por Geoffrey Lean.

Este documento se publicó originalmente en inglés. La traducción fue amablemente llevada a cabo por la Autoridad Regulatoria Nuclear (Argentina), el Consejo de Seguridad Nuclear (España), la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (México) y el Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas (Perú). En caso de discrepancia, prevalecerá la versión del idioma original.

Edición técnica: Malcolm Crick y Ferid Shannoun

Edición de texto: Susan Cohen-Unger y Ayhan Evrensel

Gráficos y diseño: Alexandra Diesner-Kuepfer

Además, las siguientes personas aportaron valiosas contribuciones y comentarios sobre este documento:

Laura Anderson, John Cooper, Susan Cueto-Habersack, Emilie van Deventer, Gillian Hirth, David Kinley, Vladislav Klener, Kristine Leysen, Kateřina Navrátilová-Rovenská, Jaya Mohan, Wolfgang-Ulrich Müller, María Pérez, Shin Saigusa, Bertrand Thériault, Hiroshi Yasuda y Anthony Wrixon.

# PRÓLOGO

Hiroshima, Nagasaki, Three Mile Island, Chernobyl y Fukushima-Daiichi: estos nombres se han asociado al miedo de la población a la radiación, ya sea por el uso de armas nucleares o por accidentes en centrales nucleares. Pero, de hecho, las personas están diariamente mucho más expuestas a la radiación proveniente de otras muchas fuentes, incluidas la atmósfera y la tierra, así como de las aplicaciones utilizadas en la medicina y la industria.



En 1955, los ensayos nucleares generaron preocupación pública acerca de los efectos de las radiaciones atómicas en el aire, el agua y los alimentos. En respuesta, la Asamblea General de las Naciones Unidas instituyó el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) para recopilar y evaluar información sobre los niveles y los efectos de la exposición a la radiación. El primer informe del Comité sentó las bases científicas para la negociación en 1963 del Tratado de Prohibición Parcial de los Ensayos Nucleares, que prohíbe los ensayos de armas nucleares en la atmósfera. Desde entonces, no ha dejado de producir informes de alto nivel sobre la exposición a la radiación, incluyendo los relativos a los accidentes de las centrales nucleares de Chernobyl y de Fukushima-Daiichi. El Comité ha venido llevando a cabo sistemáticamente trabajos de gran valor, tanto para la comunidad científica como para los responsables políticos.

Aunque la comunidad científica ha publicado información sobre las fuentes y efectos de la radiación, esta información ha tendido a ser técnica y quizá difícil de entender para el público en general, lo cual a menudo ha confundido más que informado, por lo que aún prevalece el temor y la confusión generados hace décadas. Esta publicación aborda el tema detallando la información científica más actualizada de UNSCEAR sobre los tipos de radiación, sus fuentes y efectos sobre los seres humanos y el medioambiente, y haciéndola accesible a todos los lectores.

En la actualidad, la secretaría de UNSCEAR actúa bajo los auspicios del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), que ayuda a los países a aplicar políticas y prácticas ambientalmente racionales. El mandato esencial del PNUMA contempla ayudar al público a entender la radiación y cómo afecta a la vida en este planeta.

Me complace felicitar a todos aquellos que han contribuido a esta publicación, así como a todos los miembros del Comité y sus delegaciones, que han trabajado tan diligentemente durante los últimos seis décadas en estos temas críticos.

A handwritten signature in black ink, reading "Achim Steiner". The signature is written in a cursive style with a large initial 'A' and a long, sweeping underline.

Achim Steiner  
Director General del PNUMA y  
Secretario General Adjunto de las Naciones Unidas

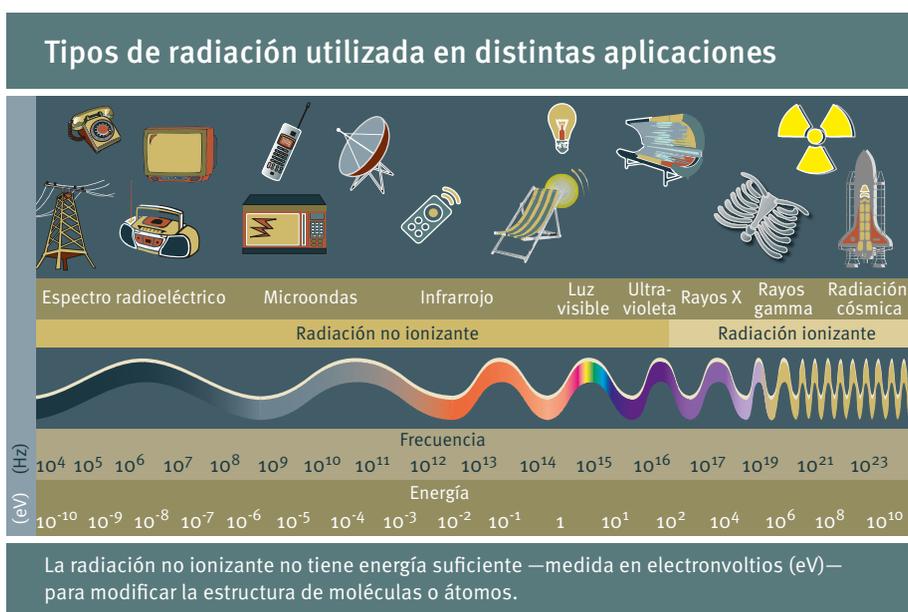
# INDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1. ¿QUÉ ES LA RADIACIÓN?</b>	<b>3</b>
1.1. Algo de historia	3
1.2. Algunos conceptos básicos	4
Desintegración radiactiva y periodo de semidesintegración	6
Unidades de radiación	7
1.3. Poder de penetración de la radiación	9
<b>2. ¿CÓMO NOS AFECTA LA RADIACIÓN?</b>	<b>11</b>
2.1. Efectos en humanos	13
Efectos tempranos para la salud	14
Efectos diferidos en la salud	15
Efectos en la descendencia	18
2.2. Efectos en los animales y las plantas	22
2.3. Relación de las dosis de radiación y los efectos	24
<b>3. ¿DE DÓNDE PROCEDE LA RADIACIÓN?</b>	<b>27</b>
3.1. Fuentes naturales	28
Fuentes cósmicas	28
Fuentes terrestres	29
Fuentes en alimentos y bebidas	32
3.2. Fuentes artificiales	32
Aplicaciones médicas	33
Armamento nuclear	37
Reactores Nucleares	39
Aplicaciones Industriales y otras	48
3.3. Promedio de exposición a la radiación para el público y los trabajadores	54



# INTRODUCCIÓN

En primer lugar, debemos distinguir entre radiación ionizante y no ionizante. La **radiación ionizante** tiene energía suficiente para liberar electrones de un átomo, dejando por tanto el átomo cargado, mientras que la **radiación no ionizante**, como las ondas de radio, la luz visible o la radiación ultra-violeta, no lo hace. Esta publicación trata de los efectos de la exposición a la radiación ionizante procedente de fuentes tanto naturales como artificiales. Por tanto, la palabra **radiación** utilizada a lo largo de todo el documento, se refiere únicamente a la radiación ionizante.



En la actualidad, sabemos más sobre las fuentes y los efectos de la exposición a la radiación que sobre casi cualquier otro agente peligroso, y la comunidad científica está constantemente actualizando y analizando su conocimiento. La mayoría de las personas es consciente de la utilización de radiación en la producción de electricidad de origen nuclear o en aplicaciones médicas. Sin embargo, apenas se conocen otros muchos otros usos de las tecnologías nucleares en la industria, la agricultura, la construcción, la investigación y otras áreas. Para alguien que lea sobre el tema por primera vez, puede resultar una sorpresa que las fuentes de radiación que provocan la mayor exposición de la población no son necesariamente los que atraen más la atención. De hecho, la mayor exposición es causada por fuentes naturales siempre presentes en el medioambiente, y el mayor contribuyente a la exposición procedente de fuentes

artificiales es la utilización de la radiación en medicina en todo el mundo. Además, la experiencia cotidiana, como los viajes en avión y vivir en ciertas partes del mundo en casas bien aisladas del exterior, pueden aumentar sustancialmente la exposición a la radiación.

Esta publicación pretende, por parte del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la secretaría del Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), ayudar a mejorar y profundizar en los conocimientos sobre las fuentes, los niveles y los efectos de la exposición a la radiación ionizante. UNSCEAR reúne a destacados científicos de 27 Estados miembros de las Naciones Unidas, y fue creado en 1955 por la Asamblea General de las Naciones Unidas para evaluar, a escala mundial, las exposiciones a la radiación, sus efectos y sus riesgos. Sin embargo, UNSCEAR no establece, ni siquiera recomienda, normas de seguridad, sino que proporciona información científica que permita su elaboración a las autoridades nacionales y otros organismos. Las evaluaciones científicas de UNSCEAR, durante los últimos sesenta años, son la principal fuente de información para esta publicación.

# 1. ¿QUE ES LA RADIACIÓN?

Para poder hablar acerca de los niveles, los efectos y los riesgos de la exposición a la radiación necesitamos, en primer lugar, abordar algunos aspectos básicos de la ciencia radiológica. Tanto la radiactividad como la radiación que produce existían en la tierra mucho antes de que surgiese la vida. De hecho, han estado presentes en el espacio desde el comienzo del universo y el material radiactivo forma parte de la tierra desde su origen. Pero la humanidad no descubrió este elemental fenómeno universal hasta finales del siglo XIX, y todavía estamos aprendiendo nuevas formas de utilizarlo.

## 1.1. Un poco de historia

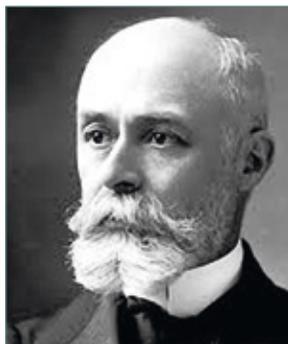
En 1895, un físico alemán, **Wilhelm Conrad Roentgen**, descubrió una radiación, a la que denominó rayos X, que podía ser utilizada para estudiar el cuerpo humano. Este descubrimiento presagió los usos médicos de la radiación, que se han ido ampliando desde entonces. Roentgen fue galardonado con el primer Premio Nobel en Física en 1901 en reconocimiento de los extraordinarios servicios que había prestado a la humanidad. Un año después del descubrimiento de Roentgen, un científico francés, **Henri Becquerel**, guardó en un cajón algunas placas fotográficas junto con fragmentos de un mineral que contenía uranio. Cuando reveló las placas encontró, para su sorpresa, que habían sido afectadas por la radiación. Este fenómeno, que se denomina **radiactividad**, se produce cuando se libera espontáneamente energía de un átomo y se mide en unidades que actualmente se denominan becquerelios (Bq) en honor de Henri Becquerel. Poco después, una joven química, **Marie Skłodowska-Curie**, llevó a cabo investigaciones adicionales y fue la primera en acuñar la palabra radiactividad. En 1898, ella y su esposo **Pierre Curie** descubrieron que conforme el uranio emitía radiación, se transformaba misteriosamente en otros elementos, a uno de los cuales denominaron polonio en honor a su patria y a otro radio, el elemento



Wilhelm C. Roentgen (1845–1923)



Marie Curie (1867–1934)



Henri Becquerel (1852–1908)

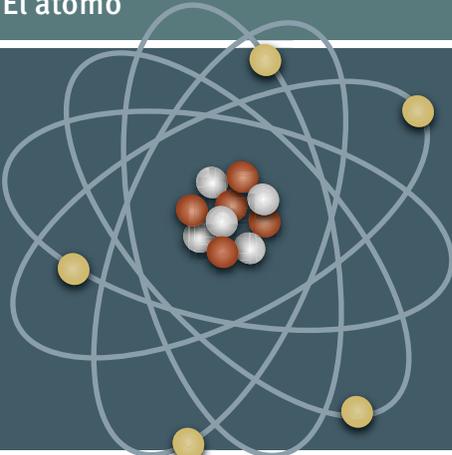
“brillante”. Marie Curie, compartió el Premio Nobel de Física en 1903 con Pierre Curie y Henri Becquerel. Ella fue la primera mujer en ganar el Premio Nobel por segunda vez, en 1911, por sus descubrimientos en radioquímica.

## 1.2. Algunos fundamentos

La búsqueda de los científicos era entender el **átomo** y, más concretamente, su estructura. Ahora sabemos que los átomos tienen un minúsculo núcleo cargado positivamente rodeado por una nube de **electrones** con carga negativa. El núcleo es alrededor de la cienmilésima parte del tamaño de todo el átomo, pero es tan denso que representa casi toda la masa del átomo.

El núcleo es generalmente un grupo de partículas, **protones** y **neutrones**, unidos fuertemente entre sí. Los protones tienen carga eléctrica positiva mientras que los neutrones no tienen carga. Los elementos químicos están determinados por el número de protones en sus átomos (p.ej. el boro tiene un átomo con 5 protones y el uranio tiene un átomo con 92 protones). Los elementos con el mismo número de protones pero con un número diferente de neutrones se denominan **isótopos** (p.ej. el uranio-235, y el uranio-238 que difieren en tres neutrones en sus núcleos). Un átomo, considerado como un todo, normalmente no está cargado ni positiva ni negativamente porque tiene el mismo número de electrones, cargados negativamente, que de protones, cargados positivamente.

**El átomo**



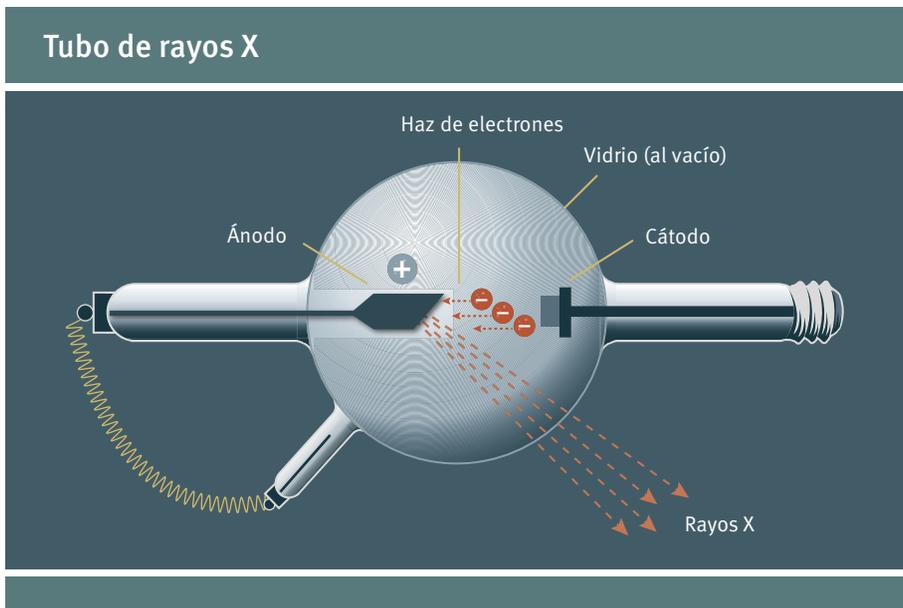
Número atómico	5	- número de electrones
Símbolo	<b>B</b>	- número de protones
Nombre	BORO	

● electrón ● protón ● neutrón

El átomo está formado por un núcleo de neutrones (de carga nula) y protones (de carga positiva) rodeado de una nube de electrones (de carga negativa). En los átomos sin carga, el número de electrones y protones es igual, y representa el número atómico del elemento.

Algunos átomos son estables por naturaleza, mientras que otros son inestables. Los átomos con núcleos inestables, que se transforman espontáneamente, liberando energía en forma de radiación, son conocidos como **radionucleidos**. Dicha energía puede interactuar con otros átomos e ionizarlos. La **ionización** es el proceso mediante el cual los átomos pasan a estar cargados positiva o negativamente debido a la ganancia o pérdida de electrones. La radiación ionizante tiene suficiente energía para desplazar a los electrones fuera de su órbita dando lugar a átomos cargados denominados **iones**. La emisión de dos protones y dos neutrones se denomina **desintegración alfa** y la emisión de electrones, **desintegración beta**. Con frecuencia, el nucleido inestable está en un estado tan excitado que la emisión de partículas no es suficiente para estabilizarlo. Entonces, genera una intensa emisión de energía en forma de radiación electromagnética, constituida por fotones, que se denomina **rayos gamma**.

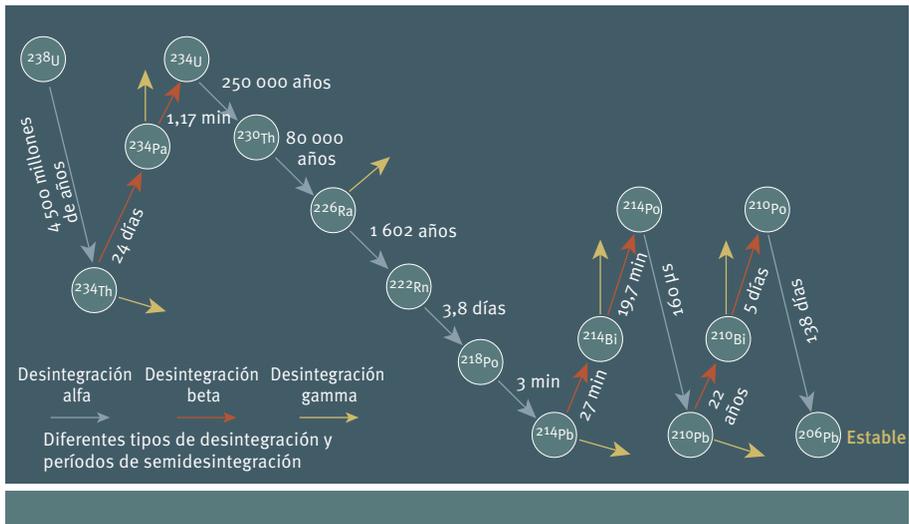
**Los rayos X** son también radiación electromagnética como los rayos gamma, pero con menor energía que los fotones. Cuando se dispara un haz de electrones emitidos por un **cátodo**, sobre un blanco denominado **ánodo**, ambos contenidos en un tubo de vidrio en el que se ha hecho el vacío, se produce un espectro de rayos X con diferentes energías. El espectro de rayos X depende del material que constituye el ánodo y de la energía de aceleración del haz de electrones. De este modo, los rayos X pueden ser generados artificialmente en el momento en que se necesitan, lo cual es muy ventajoso en aplicaciones médicas e industriales.



## Desintegración radiactiva y periodos de semidesintegración

Aun cuando todos los radionucleidos son inestables, algunos son más inestables que otros. Por ejemplo, las partículas en el núcleo de un átomo de uranio-238 (con 92 protones y 146 neutrones) apenas son capaces de mantenerse agrupadas. Con el tiempo, un grupo de dos protones y dos neutrones se separan del átomo y son emitidos en forma de partícula alfa, transformando el uranio-238 en torio-234 (con 90 protones y 144 neutrones). Pero el torio-234 también es inestable y se transforma, aunque por un proceso diferente. Mediante la emisión de electrones de alta energía, partículas beta, y la conversión de un neutrón en un protón, se convierte en protactinio-234 con 91 protones y 143 neutrones. Este, a su vez, es muy inestable y se convierte rápidamente en uranio-234; así sucesivamente el átomo continúa emitiendo partículas y transformándose, hasta convertirse finalmente en plomo-206, con 82 protones y 124 neutrones, el cual es estable. Hay muchas de estas secuencias de transformación, o *desintegración radiactiva* que es como se denomina.

### Uranio 238 — cadena de desintegración radiactiva



El tiempo que tarda la mitad de cualquier cantidad de un elemento en decaer es conocido como su *periodo de semidesintegración*. Tras un periodo de semidesintegración habrá decaído un promedio de 500 000, de cada millón de átomos. Durante el siguiente periodo de semidesintegración decaerán del orden de otros 250 000 átomos, y así sucesivamente, hasta que todos hayan decaído. Después de 10 periodos de semidesintegración, sólo quedarán unos mil átomos del millón original (es decir, aproximadamente el 0,1%). En el ejemplo

anterior, se tardaría un poco más de un minuto para que la mitad de los átomos de protactinio-234 decayeran a uranio-234. En contraste, el uranio-238 tardaría cuatro mil quinientos millones de años (4 500 000 000) para que la mitad de sus átomos decayeran a torio-234. Dicho esto, son relativamente pocos los radionucleidos que existen de forma natural en el medioambiente.

## Unidades de radiación

En la actualidad, sabemos que la energía de la radiación puede dañar los tejidos vivos, y la cantidad de energía que se deposita en el tejido vivo se expresa en términos de una magnitud denominada *dosis*. La dosis de radiación puede provenir de cualquier radionucleido, o de una serie de radionucleidos, tanto si se encuentran fuera del cuerpo o si lo irradian desde su interior, por ejemplo, después de ser inhalados o ingeridos. Las magnitudes dosimétricas se expresan de diferentes maneras dependiendo de que partes del cuerpo y que proporción del mismo son irradiados, de si una o muchas personas están expuestas, y de la duración de la exposición (por ejemplo, la exposición aguda).



Harold Gray (1905–1965)  
Rolf Sievert (1896–1966)

La cantidad de energía de radiación absorbida por kilogramo de tejido se denomina *dosis absorbida* y se expresa en unidades llamadas grays (Gy) en honor del físico inglés, y pionero en radiobiología, **Harold Gray**. Pero esto no da una visión completa porque una determinada dosis de partículas alfa puede hacer mucho más daño que la misma dosis de partículas beta o de rayos gamma. Para comparar las dosis absorbidas de diferentes tipos de radiación, deben ser ponderadas por su potencial para provocar ciertos tipos de daños biológicos. Esta dosis ponderada se denomina *dosis equivalente* que es evaluada en unidades denominadas sieverts (Sv), en honor del científico sueco **Rolf Sievert**. Un sievert son 1 000 milisieverts, al igual que un litro son 1 000 mililitros o un metro son 1 000 milímetros.

Otra consideración es que algunas partes del cuerpo son más vulnerables que otras. Por ejemplo, una determinada dosis equivalente de radiación es más probable que cause cáncer en el pulmón que en el hígado, y los órganos reproductivos son de particular preocupación

debido al riesgo de efectos hereditarios. Así, a fin de comparar las dosis cuando los diferentes tejidos y órganos son irradiados, también se ponderan las dosis equivalentes a diferentes partes del cuerpo, dando como resultado la *dosis efectiva*, que se expresa también en sieverts (Sv). Sin embargo, la dosis efectiva es un indicador de la probabilidad de cáncer y de efectos genéticos como consecuencia de dosis bajas y no está concebida como una medida de la severidad de los efectos de dosis más altas.

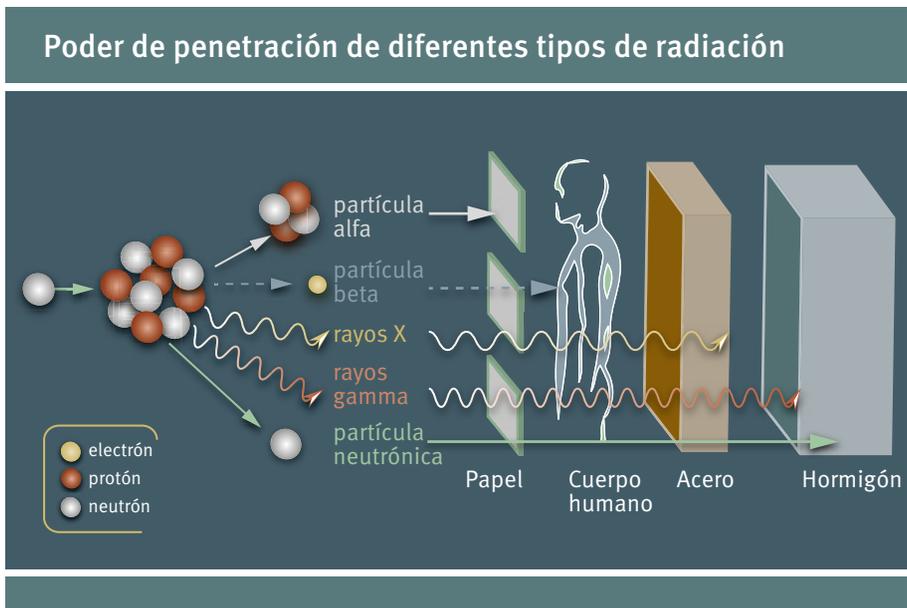
Es necesario disponer este complejo sistema de magnitudes de radiación en una estructura coherente, que permita a los expertos en protección radiológica registrar las dosis individuales de forma coherente y comparable, lo cual es sumamente importante para las personas que trabajan con radiación y que están *profesionalmente expuestos*.

Magnitudes de radiación	
Magnitud física	
Actividad	Número de transformaciones nucleares de energía por unidad de tiempo. Se mide en desintegraciones por segundo y se expresa en becquerelios (Bq).
Dosis absorbida	Cantidad de energía depositada por la radiación en una unidad de masa de material, como un tejido u órgano. Se expresa en gray (Gy), que corresponden a julios por kilogramo.
Magnitud calculada	
Dosis equivalente	Dosis absorbida multiplicada por un factor de ponderación de la radiación ( $w_R$ ), que tiene en cuenta los diferentes tipos de daño biológico que causa la radiación en un tejido u órgano. Se expresa en sievert (Sv), que corresponden a julios por kilogramo.
Dosis efectiva	Dosis equivalente multiplicada por un factor de ponderación de los tejidos ( $w_T$ ), que tiene en cuenta la susceptibilidad de distintos tejidos y órganos al daño. Se expresa en Sievert (Sv), que corresponden a julios por kilogramo.
Dosis efectiva colectiva	Suma de todas las dosis efectivas recibidas por una población o grupo de personas expuestas a radiación. Se expresa en Sievert-persona (Sv-persona).

Esto, sin embargo, sólo describe las dosis individuales. Si sumamos todas las dosis efectivas recibidas por cada individuo de una población, el resultado se denomina dosis *efectiva colectiva* o simplemente dosis *colectiva*, y se expresa en Sievert-persona (Sv-persona). Como ejemplo, la dosis colectiva anual de la población mundial es superior a 19 millones de Sv-persona correspondiente a una dosis anual promedio por persona de 3 mSv.

### 1.3. Poder de penetración de la radiación

En síntesis, la radiación puede adoptar la forma de partículas (incluyendo partículas alfa, partículas beta y neutrones) o de ondas electromagnéticas (rayos gamma y rayos X), todos con diferente energía. Las diferentes energías de emisión y tipos de partículas tienen distinto poder de penetración y, por tanto, causan diferentes efectos sobre la materia viva. Puesto que las partículas alfa están constituidas por dos protones cargados positivamente y dos neutrones, son las que poseen mayor carga de todos los tipos de radiación. Esta mayor carga implica que interactúan en mayor medida con los átomos circundantes. Dicha interacción reduce rápidamente la energía de la partícula y por lo tanto reduce el poder de penetración. Las partículas alfa pueden ser detenidas, por ejemplo, por una hoja de papel. Las partículas beta, constituidas por electrones con carga negativa, llevan menos carga y, por tanto, son más penetrantes que las partículas alfa. Las partículas beta pueden atravesar uno o dos centímetros de tejido vivo. Las partículas gamma y rayos X son ondas electromagnéticas que pueden atravesar el cuerpo humano y ser detenidas por materiales como el acero. Los neutrones pueden atravesar el cuerpo humano y ser detenidos por materiales como el hormigón.



Los rayos gamma y los rayos X son sumamente penetrantes y pueden atravesar materiales menos densos que una gruesa plancha de acero. Los neutrones producidos artificialmente son emitidos por un núcleo inestable como resultado de la fisión atómica o la fusión nuclear. Los neutrones también pueden existir de forma natural como un componente de la radiación cósmica. Debido a que los neutrones son partículas eléctricamente neutras, tienen un elevado poder de penetración cuando interaccionan con materiales o tejidos.

## 2. ¿CÓMO NOS AFECTA LA RADIACIÓN?

Antes de brindar más detalles sobre los efectos de la exposición a la radiación, debemos recordar a los pioneros en la ciencia de la radiación que ya hemos presentado. Poco después de su descubrimiento, el mismo **Henri Becquerel** sufrió el peor de los inconvenientes de la radiación —el efecto que puede causar sobre los tejidos vivos—; un vial de radio que había colocado en su bolsillo dañó su piel.

**Wilhelm Conrad Roentgen**, quien descubrió los rayos X en el año 1895, murió de cáncer de intestino en 1923. **Marie Curie**, también expuesta a la radiación durante su carrera profesional, murió de una enfermedad hematológica en 1934.

Figura en registros que a finales de la década de los 50, al menos 359 de las primeras personas que trabajaban con radiación (principalmente médicos, y otros científicos) ya habían muerto a causa de la exposición a la radiación, dado que desconocían la necesidad de usar protección.

No resulta sorprendente que las personas encargadas de irradiar a los pacientes hayan sido las primeras en desarrollar recomendaciones para la protección de los trabajadores contra la radiación. El Comité Internacional de Protección contra los Rayos X y el Radio, del cual **Rolf Sievert** fue el primer presidente electo, fue creado durante el segundo Congreso Internacional de Radiología llevado a cabo en Estocolmo en el año 1928. Después de la Segunda Guerra Mundial dicho comité fue reestructurado a fin de considerar nuevos usos de la radiación fuera del área de la medicina, y desde entonces lleva el nombre de Comisión Internacional en Protección Radiológica. Posteriormente, Rolf Sievert fue el cuarto presidente de UNSCEAR entre los años 1958 y 1960 —tiempos en los que preponderaba un interés particular sobre los efectos genéticos en los seres humanos a causa de las pruebas de armamento nuclear—.

Con una creciente concienciación sobre los riesgos asociados a la exposición a la radiación, el siglo veinte fue escenario del desarrollo de intensas investigaciones sobre los efectos de la radiación tanto en los seres humanos como en el medioambiente. La evaluación más importante respecto a los grupos de población expuestos es el estudio realizado sobre aproximadamente 86 500 supervivientes a los bombardeos atómicos en Hiroshima y Nagasaki en el año 1945, a fines de la Segunda Guerra Mundial (en lo sucesivo denominados *supervivientes a los bombardeos atómicos*). Además, se han obtenido datos fiables sobre el tema, de la experiencia con pacientes irradiados y con trabajadores involucrados en exposiciones accidentales (por ejemplo, el accidente en la central nuclear de Chernobyl); y de experimentos en laboratorio sobre animales y células.

## Fuentes de información sobre los efectos de la radiación



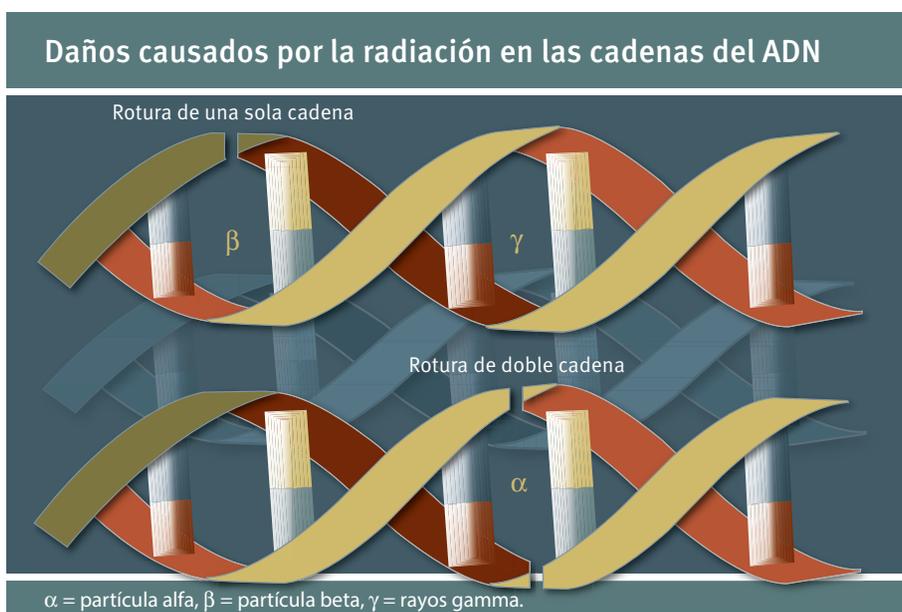
UNSCEAR analiza la información científica sobre los efectos de la exposición a la radiación en los seres humanos y el medioambiente, e intenta identificar — con la mayor precisión posible— cuáles son los efectos asociados a los diferentes niveles de exposición. Como ya se ha mencionado, la exposición a la radiación depende del tipo de radiación, del tiempo de exposición y de la cantidad de energía depositada en el material. Actualmente, UNSCEAR utiliza para sus evaluaciones las siguientes denominaciones: *baja dosis* para referirse a niveles por debajo de los 100 mGy pero mayores a 10 mGy, y *muy baja dosis* para cualquier nivel por debajo de los 10 mGy.

## Rangos dosimétricos utilizados por el UNSCEAR

Dosis alta	Más de ~ 1 Gy	Accidentes radiológicos graves (por ejemplo, el accidente de Chernobyl y sus efectos en los bomberos)
Dosis moderada	~ 100 mGy a ~ 1 Gy	Trabajadores de la operación de recuperación después del accidente de Chernobyl
Dosis baja	~ 10 mGy a ~ 100 mGy	Múltiples tomografías computarizadas (TC)
Dosis muy baja	Menos de ~ 10 mGy	Radiografía convencional (es decir, sin TC)

## 2.1. Efectos sobre los seres humanos

Desde el descubrimiento de la radiación, más de un siglo de investigación ha producido una vasta información sobre los mecanismos biológicos mediante los cuales la radiación puede afectar a la salud. Se conoce que la radiación puede producir efectos a nivel celular, causando su muerte o alteración, usualmente debido al daño directo sobre las cadenas de ácido desoxirribonucleico (ADN) en un cromosoma. Cuando el número de células muertas o dañadas es lo suficientemente elevado, podría resultar en una disfunción del órgano e incluso la muerte. Otro daño puede afectar al ADN sin destruir la célula, y usualmente se repara por completo; pero en aquellos casos en los que no se produce dicha reparación, la alteración resultante conocida como *mutación celular* se verá reflejada en las divisiones celulares subsecuentes, y podría por último derivar en cáncer. Si las células modificadas son aquellas que transmiten información hereditaria a los descendientes, pueden surgir trastornos genéticos. La información sobre mecanismos biológicos y efectos hereditarios se obtiene comúnmente de experimentos en laboratorio.



En base a la observación de su ocurrencia, los efectos en la salud después de una exposición a la radiación se definen aquí como efectos tempranos o tardíos en la salud. Generalmente, los efectos tempranos se observan mediante el diagnóstico de síndromes clínicos en individuos; y los efectos tardíos (como el cáncer) mediante *estudios epidemiológicos* a través de la observación de un aumento en la ocurrencia de una patología en una población determinada. Además, se presta particular atención a los efectos en niños y embriones/fetos, y a los efectos hereditarios.

## Efectos tempranos en la salud

Los efectos tempranos en la salud son causados por un daño/muerte celular extenso; como por ejemplo, quemaduras en la piel, pérdida de cabello o trastornos en la fertilidad. Estos efectos en la salud se caracterizan por un umbral relativamente alto que debe excederse en un corto período de tiempo para que aparezca el efecto. La severidad del efecto aumenta con el incremento de la dosis una vez que el umbral haya sido sobrepasado.

Generalmente, las dosis agudas mayores a 50 Gy generan tal daño en el sistema nervioso central que la muerte ocurre en pocos días. Aún a dosis menores a 8 Gy, las personas presentan síntomas de enfermedad por radiación, también conocida como *síndrome de irradiación aguda*. Este síndrome incluye náuseas, vómitos, diarrea, cólicos intestinales, salivación, deshidratación, fatiga, apatía, languidez, sudores, fiebre, jaqueca y baja presión arterial. El término aguda hace referencia a los problemas médicos que ocurren inmediatamente después de la exposición, frente a los que se desarrollan tras un tiempo prolongado. Sin embargo, las víctimas pueden sobrevivir en primera instancia y morir por daño gastrointestinal una o dos semanas después. Las dosis bajas pueden no ocasionar lesiones intestinales pero aun así causar la muerte después de algunos meses, principalmente por daño en la médula ósea. Las dosis aún más bajas pueden retrasar el inicio de la enfermedad y producir síntomas menos severos. Aproximadamente la mitad de aquellos que recibieron dosis de 2 Gy sufren vómitos después de unas tres horas, pero es inusual que esto ocurra para dosis menores a 1 Gy.

### Exposición accidental en la medicina

La radioterapia supone la administración de dosis altas a los pacientes. Por ello, es prioritario prevenir los efectos agudos.



Afortunadamente, si la médula ósea y el resto del sistema hematopoyético reciben menos de 1 Gy, ambos tienen una capacidad notable de regeneración y pueden recuperarse por completo —aunque existe un riesgo incrementado de padecer leucemia en años posteriores. Si se irradia tan sólo una parte del cuerpo, normalmente suficiente médula ósea sobrevivirá y podrá reparar la que ha sido dañada. Los experimentos en animales sugieren que la probabilidad de sobrevivir se acerca al 100 por ciento si al menos un décimo de la médula ósea activa no ha sido irradiada.

La capacidad de la radiación de dañar directamente al ADN celular se utiliza de manera deliberada para matar células malignas con radiación en el tratamiento para el cáncer conocido como *radioterapia*. La cantidad total de radiación aplicada en la radioterapia varía según el tipo y estadio del cáncer a ser tratado. La dosis típica para el tratamiento localizado de tumores sólidos varía entre los 20 y 80 Gy, lo cual podría poner en riesgo al paciente en caso de recibirla en una sola dosis. Por consiguiente, a fin de controlar el tratamiento, las dosis de radiación se aplican en fracciones repetidas con un valor máximo de 2 Gy. Este fraccionamiento permite que las células de los tejidos normales se recuperen, mientras que las células tumorales mueren por ser menos eficientes en su reparación tras la exposición.

## Efectos tardíos en la salud

Los efectos tardíos en la salud ocurren mucho tiempo después de la exposición. En general, la mayor parte de los efectos tardíos, son también efectos estocásticos; es decir, efectos cuya probabilidad de ocurrencia depende de la dosis de radiación recibida. Se cree que éstos se deben a las alteraciones en el material genético de una célula después de una exposición a la radiación. Algunos ejemplos de efectos tardíos son los tumores sólidos y la leucemia en personas irradiadas, y trastornos genéticos en la descendencia de personas expuestas a la radiación. La frecuencia de ocurrencia —pero no la severidad— de estos efectos en una población parece aumentar con el aumento de la dosis.

Los estudios epidemiológicos son de gran importancia para comprender los efectos tardíos en la salud tras una exposición radiológica. Los mismos utilizan métodos estadísticos que comparan la ocurrencia de un efecto (como el cáncer) en una población expuesta, respecto a una población no expuesta. En caso de hallar un aumento considerable en la población expuesta, podría indicar que se encuentra relacionada con la exposición a la radiación para la población en general.

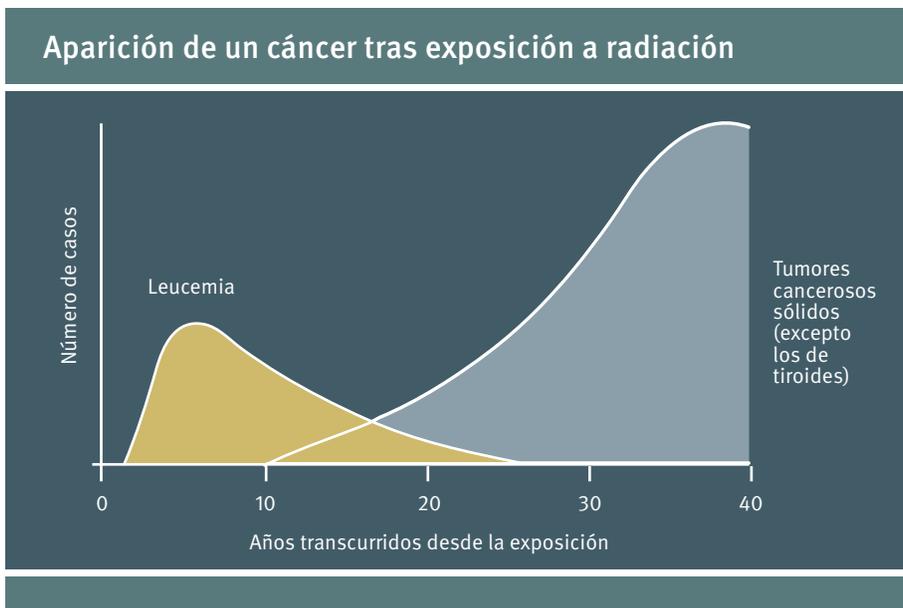
El estudio epidemiológico de los supervivientes a los bombardeos atómicos es la evaluación a largo plazo más importante realizada sobre poblaciones expuestas a la radiación. Este es el estudio más exhaustivo debido a la gran

cantidad de personas involucradas —número esencialmente representativo de la población general— que recibió una amplia variedad de dosis distribuidas de manera bastante uniforme en el cuerpo. Las estimaciones de las dosis recibidas por este grupo son también relativamente conocidas. Hasta el momento, el estudio ha revelado unos pocos cientos de casos de cáncer más de los que se podrían esperar en dicho grupo si no hubieran sido expuestos a la radiación. Ya que muchos de los supervivientes a los bombardeos atómicos se encuentran aún con vida, los estudios continúan a fin de completar la evaluación.

### Cáncer

El cáncer es responsable de al menos 20 por ciento de todas las muertes y es la causa de muerte más común en los países industrializados, después de las afecciones cardiovasculares. Se estima que aproximadamente cuatro de cada diez individuos de la población en general padecerá cáncer durante su vida, aún sin exposición radiológica. En los últimos años, los cánceres más comunes entre los hombres han sido de pulmón, próstata, colon, estómago e hígado; mientras que entre las mujeres han sido los cánceres de mama, colon, pulmón, cuello uterino y estómago.

El desarrollo de un cáncer es un proceso complejo, el cual consiste en varios estadios. Un fenómeno iniciador que probablemente afecte a una sola célula parece comenzar el proceso, pero se necesita una serie de otros eventos antes de que la célula se transforme en maligna y el tumor se desarrolle. El cáncer sólo se manifiesta mucho después del primer daño, tras un período de latencia. La probabilidad de



sufrir cáncer después de una exposición a la radiación es una gran preocupación, y podría calcularse para un grupo determinado si éste fuera irradiado a un nivel suficientemente alto de radiación que cause un incremento en la ocurrencia que supere las incertidumbres estadísticas y de otro tipo. Sin embargo, la contribución real de la radiación como causa del cáncer sigue siendo incierta.

La leucemia, el cáncer de tiroides y el óseo aparecen a los pocos años de la exposición a la radiación, mientras que la mayoría de los cánceres de otro tipo no se manifiestan hasta pasada una década, o a menudo varias, después de la exposición. Sin embargo, ningún tipo de cáncer es causado únicamente por la exposición a la radiación, resultando imposible distinguir a los tumores radio-inducidos de aquellos que surgen por otras razones. No obstante, es importante estimar la probabilidad de contraer cáncer como consecuencia de ciertas dosis de radiación a fin de brindar una base científica sólida para establecer límites de exposición.

Los estudios de las personas que recibieron tratamiento médico con uso de radiación, personas ocupacionalmente expuestas, y sobre todo, los supervivientes a los bombardeos atómicos han construido las bases del conocimiento sobre la relación entre el cáncer y la exposición radiológica. Dichos estudios abarcan muestras grandes de personas irradiadas en diversas partes del cuerpo y a las que se les realizó un seguimiento por períodos de tiempo razonablemente largos. Sin embargo, algunos estudios tienen limitaciones mayores, principalmente una distribución de edades diferente respecto de la población en general, y la evidencia de que muchos pacientes ya se encontraban enfermos en el momento de la irradiación y ya habían estado recibiendo tratamiento por cáncer.

Resulta más relevante todavía que toda la información se basa en el estudio de individuos cuyos tejidos han recibido dosis altas de radiación, de 1 Gy o más, ya sea en una dosis o en períodos cortos de tiempo. Existe escasa información sobre los efectos de exposición a bajas dosis de radiación por un largo período de tiempo, sólo unos pocos estudios sobre los efectos del rango de dosis que reciben comúnmente las personas que trabajan con radiación, y prácticamente no hay información directa sobre las consecuencias de la exposición a las que el público en general se encuentra sometido rutinariamente. Los estudios deberían realizar un seguimiento sobre una gran cantidad de personas durante un período prolongado, y aun así podrían finalmente ser deficientes para observar aumentos en la ocurrencia de cáncer en comparación con las tasas de cáncer basal.

UNSCEAR llevó a cabo extensos análisis sobre la ocurrencia de cáncer en las poblaciones expuestas a la radiación, y calculó que la probabilidad adicional de morir por un cáncer causado por una exposición radiológica superior a 100 mSv es de aproximadamente 3 a 5 por ciento por sievert.

## *Otros efectos en la salud*

Las dosis altas de radiación al corazón aumentan la probabilidad de trastornos cardiovasculares (por ejemplo, paros cardíacos). Dichas exposiciones podrían ocurrir durante una radioterapia, aunque las técnicas actuales resultan en dosis cardíacas más bajas. Sin embargo, no existe evidencia científica que concluya que la exposición a bajas dosis de radiación cause enfermedades cardiovasculares.

UNSCEAR ha reconocido que existe un aumento en la ocurrencia de cataratas entre los trabajadores de emergencia de Chernobyl, posiblemente asociada a las altas dosis de radiación. Del mismo modo, ha estudiado los efectos de la radiación sobre el sistema inmunológico humano en los supervivientes a los bombardeos atómicos, en trabajadores de emergencia de la central nuclear Chernobyl y en pacientes bajo tratamiento de radioterapia. La evaluación de los efectos de la radiación en el sistema inmunológico se realiza mediante la estimación de cambios en el número de células, o bien utilizando una variedad de análisis funcionales. Las dosis altas de radiación suprimen el sistema inmunológico principalmente debido al daño en los linfocitos. Su reducción se emplea actualmente a modo de indicador temprano para determinar la dosis de radiación después de una exposición aguda.

## *Efectos en la descendencia*

Si ocurriera un daño por radiación en las células reproductivas (esperma u óvulo) podría inducir efectos hereditarios en los descendientes. Además, la radiación puede dañar de manera directa a un embrión o feto en desarrollo dentro del útero. Es importante distinguir la exposición radiológica en adultos, niños y embriones/fetos. Para estos grupos, UNSCEAR ha llevado a cabo extensos análisis sobre los efectos en la salud, incluidos los efectos hereditarios.

## *Efectos en los niños*

Los efectos en la salud humana dependen de diversos factores físicos. Debido a sus diferencias anatómicas y fisiológicas, el impacto de la exposición radiológica sobre infantes o adultos es diferente. Además, puesto que los niños tienen cuerpos más pequeños y se encuentran menos blindados (protegidos) por capas de tejidos, la dosis que reciben sus órganos internos es más alta que en el caso de los adultos para una determinada exposición externa. Asimismo, los niños son más bajos que los adultos, por lo que podrían recibir mayores dosis de los radionucleidos depositados en el suelo.

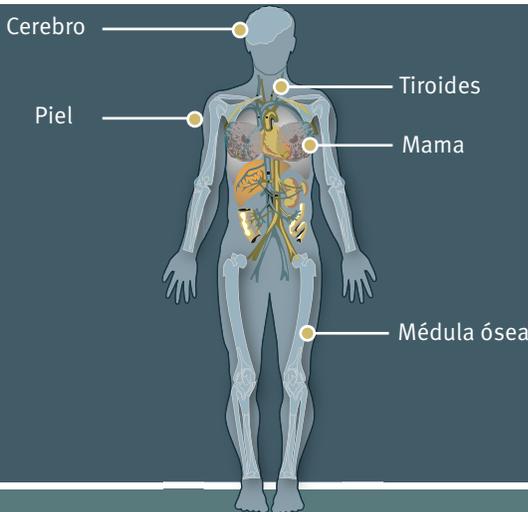
En lo que respecta a la exposición interna en los niños, los radionucleidos concentrados en uno de sus órganos irradian a otros (más de lo que irradiarían en un

adulto) debido a que los niños tienen cuerpos más pequeños, y por consiguiente sus órganos se encuentran más cerca. Existen muchos otros factores asociados a la edad en relación al metabolismo y la fisiología que conforman una diferencia sustancial en dosis para diferentes edades. Diversos radionucleidos son de particular interés en relación a la exposición interna en niños. Los accidentes que involucran la emisión de yodo-131 radiactivo pueden ser significativas fuentes de exposición de la tiroides. Para una determinada incorporación, la dosis para tiroides de un niño es aproximadamente nueve veces mayor que para un adulto. Los estudios realizados sobre el accidente en la central nuclear de Chernobyl han confirmado la relación entre el cáncer de tiroides y el yodo-131, el cual se concentra principalmente en dicho órgano.

Los estudios epidemiológicos han demostrado que tras una misma exposición a la radiación, los jóvenes menores a 20 años suelen ser dos veces más propensos a desarrollar leucemia que los adultos; y que los niños menores a 10 años son particularmente vulnerables. Otros estudios sugieren que los niños son de tres a cuatro veces más propensos a morir de leucemia que los adultos. Asimismo, existen otros análisis que han indicado que las jóvenes expuestas antes de los 20 años tienen el doble de probabilidad de desarrollar cáncer de mama que las mujeres adultas. Los niños tienen más probabilidad que un adulto de desarrollar cáncer después de una exposición, pero podría no aparecer hasta más tarde en la vida cuando alcancen una edad en la cual, normalmente, el cáncer se manifiesta.

UNSCEAR ha analizado material científico que indica que la ocurrencia de cáncer en infantes es más variable que en los adultos y que depende tanto del

## Órganos especialmente radiosensibles de los niños



Los niños y adolescentes menores de 20 años expuestos a radiación tienen alrededor del doble de probabilidades de contraer un **tumor cerebral** que los adultos expuestos a la misma dosis. Se ha observado un riesgo similar de **cáncer de mama** entre las niñas y adolescentes menores de 20 años expuestas a radiación.

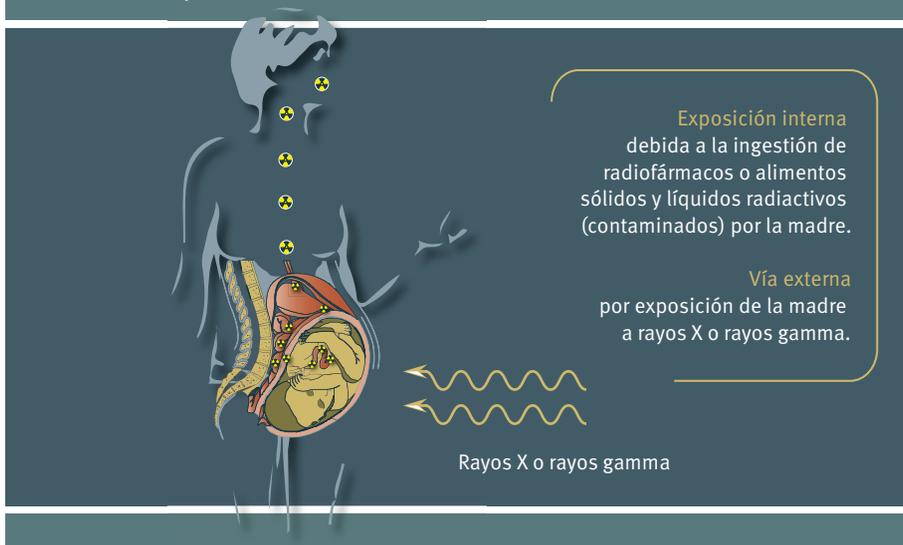
tipo de tumor como del género y edad. El término *radiosensibilidad* en relación a la inducción del cáncer se refiere a la tasa de tumores causados por la irradiación. Los estudios realizados sobre las diferencias en radiosensibilidad entre adultos y niños han indicado que los últimos son más sensibles al desarrollo de cánceres de tiroides, cerebral, de piel y mama y leucemia.

Las diferencias en los efectos tempranos en la salud en niños tras altas dosis (como aquellas que se reciben en radioterapia) son complejas y pueden explicarse por la interacción de diversos tejidos y mecanismos biológicos. Algunos efectos son más evidentes para la exposición durante la niñez que en la adultez (por ejemplo, anomalías cerebrales, cataratas y nódulos tiroideos); y existen algunos pocos efectos para los cuales los tejidos de los niños son más resistentes (como los pulmones y ovarios).

### *Efectos en niños no nacidos*

Un embrión o feto puede verse expuesto mediante material radiactivo transferido por la madre por ingestión de alimentos o bebida (exposición interna) o directamente por exposición externa. Puesto que el feto se encuentra protegido por el útero, en la mayoría de los eventos de exposición radiológica su dosis de radiación tiende a ser más baja que la dosis que recibe su madre. Sin embargo, el embrión y el feto son particularmente sensibles a la radiación, y las consecuencias en la salud por exposición pueden ser severas, aun en dosis de radiación más bajas que las que afectan a su madre inmediatamente. Dichas consecuencias pueden incluir retraso en el crecimiento, malformaciones, deterioro en las funciones cerebrales y cáncer.

### Vías de exposición de los embriones a radiación



El desarrollo de los mamíferos en el útero se divide aproximadamente en tres etapas. Se conoce que la radiación podría matar a un embrión durante la primera etapa, la cual transcurre desde la concepción hasta la adhesión a la pared uterina, y abarca las primeras dos semanas de embarazo en humanos. Si bien resulta dificultoso estudiar lo que sucede en esta etapa, la información, procedente principalmente de experimentos con animales, confirma el efecto mortal sobre el embrión temprano de dosis de radiación superiores a determinados umbrales.

Durante la siguiente etapa, comprendida entre la segunda y octava semana de embarazo, el mayor riesgo es que la radiación conlleve la malformación de los órganos en crecimiento y hasta la muerte al momento del nacimiento. Los experimentos realizados en animales han demostrado que los órganos (por ejemplo: los ojos, el cerebro y el esqueleto) son particularmente vulnerables a la malformación si se los irradia durante su desarrollo.

El mayor daño pareciera ocurrir en el sistema nervioso central después de la octava semana; cuando la tercera y última etapa del embarazo comienza. Se ha logrado un gran avance en el entendimiento de los efectos de la exposición radiológica en el cerebro de los niños no nacidos. Como ejemplo, 30 niños de los supervivientes a los bombardeos atómicos de los aproximadamente 1 600 expuestos previo a su nacimiento con una dosis de 1 Gy, tuvieron discapacidades intelectuales extremas.

Existe controversia respecto de si la exposición radiológica en los embriones puede causarles cáncer a lo largo de su vida. Los experimentos en animales han fallado en demostrar cualquier relación particular. UNSCEAR, ha intentado calcular los riesgos generales para los niños no nacidos para un número de efectos de irradiación —mortalidad, malformación, discapacidad intelectual y cáncer. En términos generales, se estima que no más de dos de cada 1 000 niños nacidos vivos que han sido irradiados con una dosis de centésima de gray en el útero podrían verse afectados; en comparación con el 6 por ciento que desarrolla los mismos efectos de manera natural.

### *Efectos hereditarios*

La radiación podría causar desórdenes genéticos al alterar las células que transmiten información hereditaria a los descendientes. El estudio de dichos desórdenes resulta dificultoso ya que es escasa la información disponible sobre los daños genéticos que los humanos padecen por exposición; en parte porque la identificación completa de los efectos hereditarios requiere el paso de muchas generaciones, y en parte porque —como para el cáncer— estos efectos podrían no distinguirse de aquéllos que se producen por otras causas.

Muchos de los embriones y fetos severamente afectados no sobreviven. Se ha estimado que al menos la mitad de todos los abortos espontáneos involucran una constitución genética anormal. Incluso si sobreviven al nacimiento, los bebés con desórdenes genéticos tienen aproximadamente 5 veces más probabilidad de morir antes de cumplir cinco años que los niños normales.

Los efectos hereditarios se dividen en dos categorías: aberraciones cromosómicas que involucran cambios en el número o en la estructura de los cromosomas, y mutaciones en los propios genes. Éstos efectos pueden manifestarse en las siguientes generaciones, pero no necesariamente.

Los estudios realizados sobre los niños cuyos padres fueron supervivientes a los bombardeos atómicos no han podido identificar efectos hereditarios observables, lo cual no indica que no hayan sufrido ningún daño sino que la moderada exposición radiológica, aún de una población relativamente grande, no presenta un impacto observable. Sin embargo, los estudios experimentales realizados sobre plantas y animales expuestos a dosis altas han demostrado con claridad que la radiación puede inducir efectos hereditarios. Es poco probable que los humanos sean una excepción.

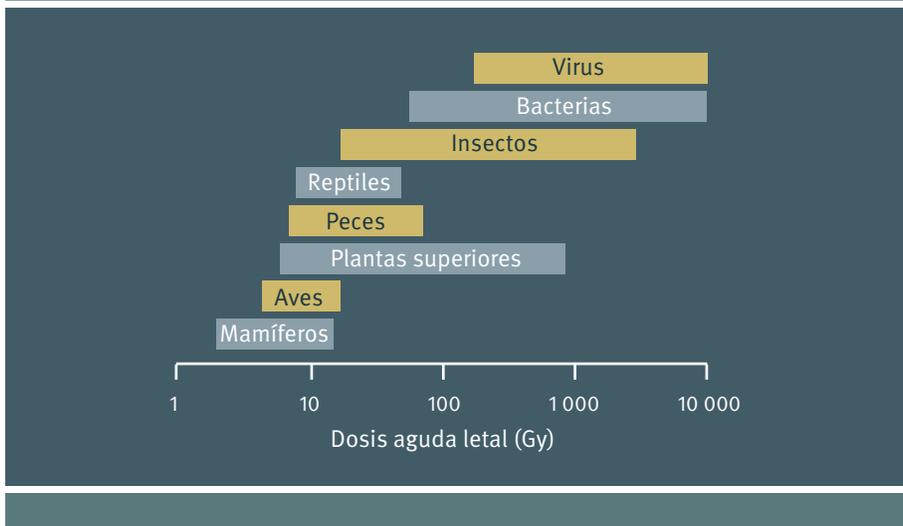
UNSCEAR se ha centrado solamente en los efectos hereditarios severos y estimó que el riesgo total es de aproximadamente 0,3–0,5% por gray (lo cual es inferior a un décimo de la probabilidad de ocurrencia de cáncer mortal) para la primera generación posterior a la exposición.

## 2.2. Efectos en animales y plantas

Los efectos de la exposición a la radiación en animales y plantas reciben actualmente más atención que antes. En décadas pasadas, la visión que prevalecía indicaba que si la vida humana se encontraba adecuadamente protegida, las plantas y animales contarían con una protección similar. UNSCEAR evaluó los efectos de la exposición en plantas y animales, y halló que son improbables los efectos en dichas poblaciones en el rango teórico de dosis entre 1–10 Gy; y asimismo, que las respuestas individuales a la exposición varían (siendo los mamíferos los animales más sensibles). Los efectos que son probablemente significativos a nivel poblacional se relacionan con la fertilidad, la mortalidad y la inducción a mutaciones. Los *cambios reproductivos*, como en el número de descendientes, son un indicador más sensible de los efectos de la radiación que la mortalidad.

Las *dosis letales* representan dosis en las que el 50 por ciento de los sujetos expuestos podrían morir. En el caso de las plantas irradiadas en un período de tiempo relativamente corto (*aguda*), se ha observado que oscila entre valores menores a 10 Gy hasta aproximadamente 1 000 Gy. Generalmente, las plantas más grandes son más radiosensibles que las pequeñas. Las dosis letales varían entre 6 y 10 Gy para los mamíferos pequeños y alrededor de los 2,5 Gy para los grandes. Algunos insectos, bacterias y virus pueden tolerar dosis mayores a 1 000Gy.

### Rangos de las dosis agudas letales para algunos animales y plantas



Las observaciones realizadas sobre la exposición a la radiación de animales y plantas en áreas cercanas a la central nuclear de Chernobyl han sido la principal fuente de información. UNSCEAR evaluó las vías a través de las cuales se expuso al medioambiente, y desarrolló nuevos enfoques para la evaluación de los potenciales efectos de dicha exposición.

Recientemente, UNSCEAR estimó dosis y efectos asociados a la exposición a la radiación para algunos animales y plantas tras el accidente en la central nuclear de Fukushima-Daiichi y concluyó que, en general, las exposiciones fueron muy bajas como para observar efectos agudos. Sin embargo, no se podrían descartar cambios en los *biomarcadores*, que son indicadores de una determinada enfermedad o del estado fisiológico de un organismo (en particular para los mamíferos), pero su relevancia para la integridad de la población de dichos organismos no fue clara.

Cabe destacar que las medidas de protección y reparadoras llevadas a cabo para la reducción de la exposición en humanos puede implicar un impacto significativo más amplio. Por ejemplo, puede afectar tanto a bienes y servicios ambientales, recursos utilizados en la agricultura, silvicultura, pesca y turismo; como a instalaciones utilizadas en actividades espirituales, culturales y recreativas.

### 2.3. Relación entre las dosis y los efectos de la radiación

Al resumir la relación entre las dosis de radiación y los efectos en la salud, UNSCEAR ha destacado la importancia de distinguir entre las observaciones realizadas sobre los efectos existentes en la salud de poblaciones expuestas, y las proyecciones teóricas de posibles efectos a futuro. Para ambas situaciones resulta relevante considerar cualquier incertidumbre o imprecisión; ya sea en las mediciones radiológicas, consideraciones estadísticas u otros factores.

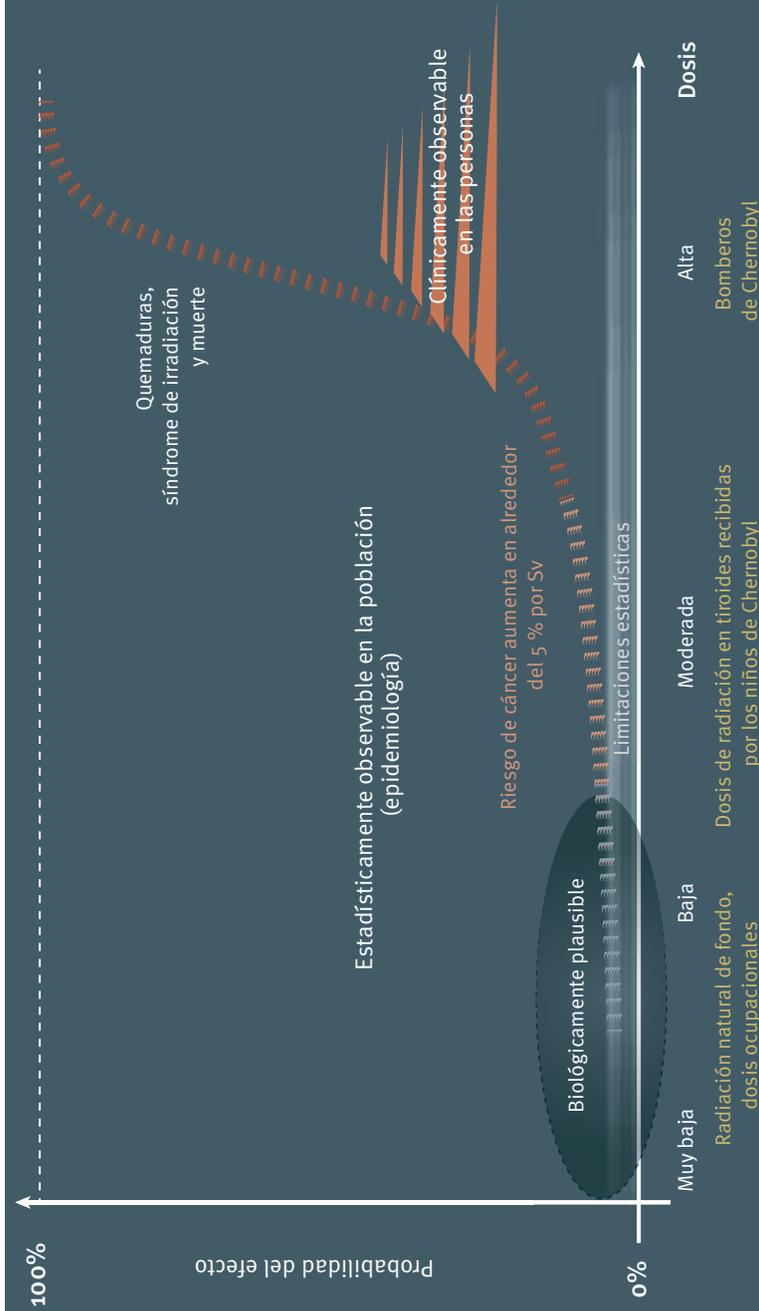
Dado el estado de conocimiento actual, los efectos en la salud observados pueden atribuirse con cierta confianza a la exposición a la radiación si los efectos tempranos (como por ejemplo las quemaduras en la piel) ocurren en los individuos después de recibir dosis altas, superiores a 1 Gy. Dichas dosis podrían producirse en accidentes; como es el caso de las recibidas por los trabajadores de emergencia durante el accidente en la central nuclear de Chernobyl o por pacientes durante un accidente en radioterapia.

Mediante el uso de métodos epidemiológicos es posible atribuir un aumento en la ocurrencia de efectos tardíos en la salud (ej. cáncer) en una población expuesta a dosis de radiación moderadas si el incremento observado es lo suficientemente alto para superar cualquier incertidumbre. Sin embargo, no existen biomarcadores disponibles en la actualidad para distinguir si un cáncer fue causado por una exposición a la radiación o no.

En casos de exposición baja o muy baja —más característicos de exposiciones medioambientales u ocupacionales—, los cambios en la ocurrencia de efectos tardíos en la salud no se han confirmado debido a las incertidumbres estadísticas, entre otras. No obstante, tales efectos no pueden ser descartados.

Respecto a los posibles efectos en la salud a futuro, existe un entendimiento sobre el modo de estimar la probabilidad de ocurrencia de estos efectos para dosis altas y moderadas. Sin embargo, para las dosis bajas o muy bajas, es necesario realizar suposiciones y utilizar modelos matemáticos para calcular la probabilidad de cualquier efecto en la salud y como resultado se obtienen valores muy inciertos. Como consecuencia, para las dosis bajas y muy bajas, UNSCEAR ha optado por no utilizar esos modelos en sus evaluaciones para

## Relación entre las dosis de radiación y los efectos en la salud



proyecciones numéricas —por ejemplo, las de los accidentes en Chernobyl o Fukushima-Daiichi— debido a las inaceptables incertidumbres en las predicciones. Aun así, para las comparaciones en salud pública o con fines de protección radiológica, realizar tales cálculos puede resultar útil siempre que las incertidumbres sean tomadas en consideración y las limitaciones sean claramente explicadas.

### 3. ¿DE DÓNDE PROCEDE LA RADIACIÓN?

La radiación procede de muchas fuentes diferentes y nos encontramos constantemente expuestos a ella. Todas las especies de nuestro planeta han existido y evolucionado en ambientes con exposición a la radiación natural de fondo; y más recientemente, los humanos y otros organismos también hemos estado expuestos a fuentes artificiales desarrolladas durante el último siglo. Más del 80 por ciento de nuestra exposición proviene de fuentes naturales, y sólo el 20 por ciento restante proviene de fuentes artificiales propias de la actividad humana —principalmente de las aplicaciones radiológicas utilizadas en medicina. En la presente publicación, la exposición a la radiación se clasificará según el origen de sus fuentes, enfocándose en lo que recibe el público en general. Asimismo, con fines regulatorios (protección radiológica) la exposición a la radiación se abordará para diferentes grupos. Por consiguiente, se brindará aquí información adicional sobre los pacientes —expuestos debido al uso médico de la radiación— y a los individuos expuestos en sus lugares de trabajo.

La radiación también puede categorizarse según el modo en que nos irradia. Las sustancias radiactivas y la radiación en el medioambiente pueden irradiar nuestro cuerpo desde el exterior —*externamente*—; o también desde el interior —*internamente*— al inhalar las sustancias del aire, ingerirlas mediante alimentos o agua, o al absorberlas por la piel o por nuestras heridas. Consideradas en conjunto, las dosis por exposición interna o externa son muy similares.

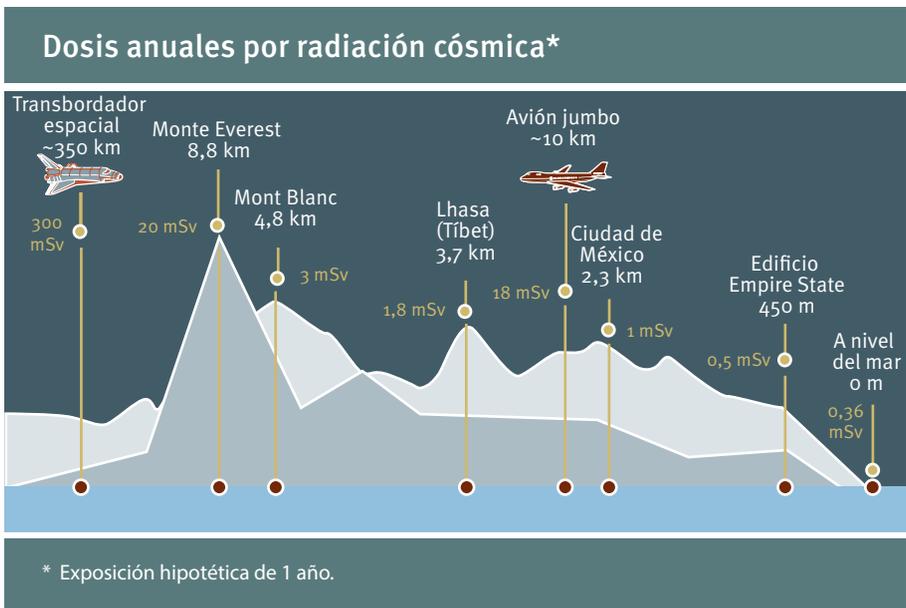


### 3.1. Fuentes naturales de radiación

Desde su creación, la Tierra ha estado expuesta a la radiación tanto del espacio exterior, como del material radiactivo en su corteza y núcleo. No existe una manera de evitar exponerse a dichas fuentes naturales; de hecho, éstas causan la mayor parte de la exposición de la población mundial. La dosis anual efectiva promedio por persona es de aproximadamente 2,4 mSv a nivel global, y oscila entre 1 y más de 10 mSv según el lugar donde habitan. Los edificios pueden retener un gas radiactivo particular, denominado radón; o incluso el material del edificio puede contener radionucleidos que aumentan la exposición a la radiación. A pesar de que las fuentes son naturales, podemos modificar nuestra exposición mediante nuestras elecciones: el modo y el lugar en el que vivimos, o aquello que bebemos o comemos.

#### Fuentes cósmicas

Los rayos cósmicos conforman una gran fuente natural de exposición externa a la radiación. La mayoría de estos rayos se originan en el espacio interestelar — algunos de ellos emitidos durante erupciones solares—. Estos irradian la Tierra de manera directa e interactúan con la atmósfera produciendo así distintos tipos de radiación y material radiactivo. Asimismo, son la fuente dominante de radiación en el espacio exterior. Mientras que la atmósfera y el campo magnético de nuestro planeta reducen considerablemente la radiación cósmica, algunas partes de su territorio se encuentran más expuestas que otras. Debido a que



el campo magnético desvía la radiación cósmica hacia los polos, éstos reciben más radiación que las regiones ecuatoriales.

Por otra parte, el nivel de exposición aumenta con la altura ya que hay menos aire por lo alto que actúe como escudo protector. Así es como los individuos que viven a nivel del mar reciben en promedio una dosis efectiva anual cercana a los 0,3 mSv por fuentes cósmicas de radiación, o aproximadamente 10–15 por ciento de su dosis total por fuentes naturales. Aquellos que viven por encima de los 2 000 metros de altura reciben varias veces dicha dosis. Los pasajeros aéreos pueden verse expuestos a dosis aún mayores, ya que la exposición a la radiación de fuentes cósmicas depende no solo de la altitud sino de la duración del vuelo. Por ejemplo, para un vuelo de 10 horas de duración, en altitud crucero, la dosis efectiva promedio es de 0,03–0,08 mSv. En otras palabras, un vuelo ida y vuelta Nueva York-París expondría a una persona a recibir cerca de 0,05 mSv; dosis aproximadamente igual a la dosis efectiva que recibe un paciente en una radiografía regular de tórax. A pesar de que la dosis efectiva estimada que recibe cada pasajero durante un vuelo es baja, la dosis colectiva puede ser elevada debido al gran número de pasajeros y vuelos en el mundo.

## EXPOSICIÓN EN EL ÁREA DE TRABAJO

---

Las dosis causadas por fuentes cósmicas son particularmente importantes para las personas que viajan con frecuencia como los pilotos y la tripulación de cabina, quienes reciben un promedio de 2–3 mSv anuales. Asimismo, se han calculado las dosis para ciertas misiones al espacio exterior. Las dosis informadas para misiones cortas de este tipo oscilaron entre 2–27 mSv según la actividad solar. Sin embargo, en una misión de cuatro meses a la Estación Espacial Internacional que órbita la Tierra a 350 km, un astronauta recibe una dosis efectiva cercana a los 100 mSv.

## Fuentes terrestres

### *Suelo*

Todo lo que se encuentra en y sobre la Tierra contiene *radionucleidos primigenios*. Estos radionucleidos de vida extremadamente larga, que se encuentran en el suelo, (como el potasio-40, uranio-238 y torio-232) junto con los radionucleidos en los que éstos decaen (tales como el radio-226 y el radón-222) han emitido radiación desde antes que nuestro planeta tomara su forma actual. UNSCEAR estima que cada persona en el mundo recibe, en promedio, una dosis efectiva cercana a los 0,48 mSv anual como exposición externa por fuentes terrestres.

La exposición externa varía considerablemente entre un lugar y otro. Estudios realizados en Francia, Alemania, Italia, Japón y Estados Unidos, por ejemplo, sugieren que aproximadamente el 95 por ciento de sus poblaciones vive en áreas donde la dosis promedio anual al aire libre oscila entre los 0,3 y 0,6 mSv. Sin embargo, en algunas regiones de estos mismos países los habitantes pueden recibir dosis superiores a 1 mSv anual; y en otros lugares del mundo la exposición a la radiación que proviene de fuentes terrestres es aún más elevada. Por ejemplo, en la costa sudoeste de Kerala en India, una extensa franja de 55 km. Densamente poblada contiene arenas ricas en torio y sus habitantes reciben en promedio 3,8 mSv al año. Del mismo modo, se conocen otras regiones con altos niveles de fuentes naturales terrestres de radiación en Brasil, China, República Islámica de Irán, Madagascar y Nigeria.

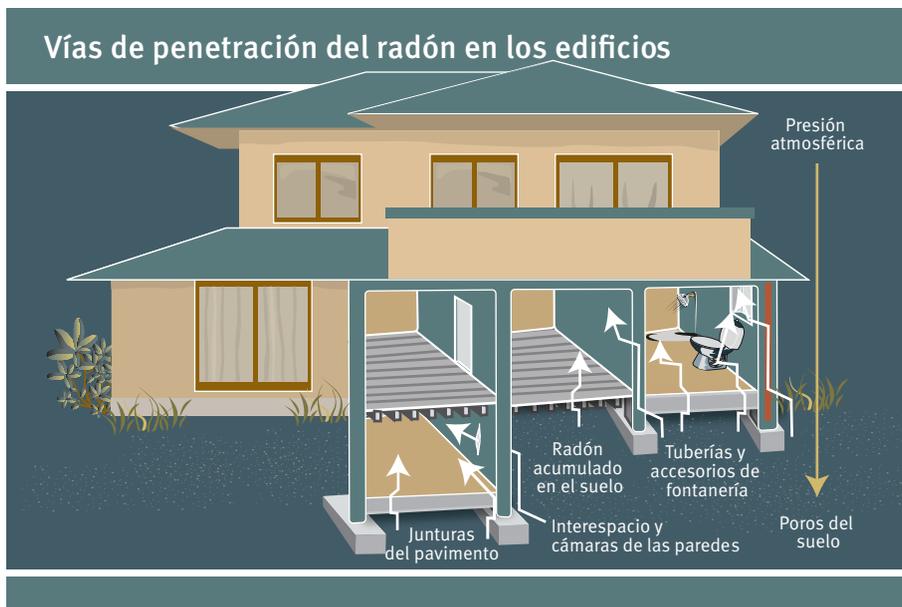
### *Gas radón*

El radon-222 es un radionucleido en forma de gas que normalmente emana del suelo. Éste es producto de una serie de decaimientos de uranio-238 presente en las rocas y en el suelo de nuestro planeta. Cuando se lo inhala, parte de los productos de corta vida que genera su decaimiento (principalmente polonio-218 y -214) son retenidos en los pulmones e irradian las células en el tracto respiratorio con partículas alfa. El radón es, por consiguiente, una causa principal del cáncer de pulmón tanto para individuos fumadores como para los no fumadores. No obstante, los primeros son mucho más vulnerables debido a la fuerte interacción entre el acto de fumar y la exposición al radón.

El radón se encuentra presente en toda la atmósfera, y puede filtrarse directamente en los edificios por medio de sótanos y pisos, donde su *concentración*—cantidad de actividad en términos de decaimientos por tiempo en un volumen determinado de aire— puede aumentar. Cuando se utiliza calefacción en las viviendas, el aire caliente asciende y se escapa de la parte superior por medio de ventanas y rajaduras, lo cual genera una baja presión en la planta baja y sótano. Este hecho genera una succión activa del radón que se aloja en el subsuelo a través de rajaduras y filtraciones (por ejemplo, alrededor de las entradas de las tuberías de servicio) en la parte inferior de la vivienda.

El promedio mundial de concentración de radón en interiores es de aproximadamente 50 Bq/m<sup>3</sup>; sin embargo, dicha cifra oculta la gran variabilidad que existe entre un lugar y otro. En general, las concentraciones nacionales promedio varían ampliamente entre valores menores a 10 Bq/m<sup>3</sup> en Chipre, Egipto y Cuba, hasta otros mayores a 100 Bq/m<sup>3</sup> en República Checa, Finlandia y Luxemburgo. En algunos países como Canadá, Suecia y Suiza existen viviendas con concentraciones de radón de entre 1 000 y 10 000 Bq/m<sup>3</sup>. No obstante, la cantidad de vivien-

das con tan elevado nivel de concentración es muy pequeña. Ciertos factores que causan dicha variación son: la geología subyacente del lugar, la permeabilidad del suelo, el material de construcción y la ventilación de las edificaciones.



La ventilación, la cual depende del clima, resulta ser un factor clave. Si los edificios se encuentran ventilados correctamente, como suele ser en un clima tropical, es improbable que la acumulación de radón sea abundante. Por el contrario, las concentraciones de radón pueden aumentar considerablemente en los lugares que tienden a estar menos ventilados. Por consiguiente, el efecto de una ventilación limitada es muy importante al momento de diseñar edificios con eficiencia energética. En muchos países se han llevado a cabo exhaustivos programas de medición que han conformado en el base para la implementación de medidas a fin de reducir las concentraciones de radón en interiores.

El nivel de radón en agua es usualmente muy bajo, pero algunos suministros tienen concentraciones muy altas; por ejemplo, pozos profundos ubicados en Helsinki, Finlandia y Hot Springs en Arkansas, Estados Unidos. El radón en agua puede contribuir a un incremento en la concentración de radón en aire, particularmente en el cuarto de baño al tomar una ducha. Sin embargo, UNSCEAR ha llegado a la conclusión de que la contribución de dosis de radón que se ingiere al beber es menor a la dosis que se incorpora por inhalación. Asimismo, UNSCEAR estima que la dosis efectiva anual promedio de radón es de 1,3 mSv, la cual representa casi la mitad de la dosis que el público recibe por fuentes naturales.

## EXPOSICIÓN EN EL ÁREA DE TRABAJO

---

En determinadas áreas de trabajo, la inhalación de gas radón predomina en la exposición a la radiación de los trabajadores. El radón es la fuente principal de exposición a la radiación en todo tipo de mina subterránea. El promedio anual de la dosis efectiva para un minero que extrae carbón es de aproximadamente 2,4 mSv, y para otro tipo de minero cerca de 3 mSv. En la industria nuclear, la dosis efectiva promedio anual de un trabajador se aproxima a 1 mSv, principalmente debido a la exposición al radón en minas de uranio.

### Fuentes en alimentos y bebidas

Los alimentos y las bebidas podrían contener —entre otros— radionucleidos primigenios que principalmente provienen de fuentes naturales. Las rocas y los minerales presentes tanto en suelo como en agua contienen radionucleidos que pueden transferirse desde éstos a las plantas, y luego a los animales. De este modo, las dosis varían según las concentraciones de radionucleidos tanto en agua como en alimentos, y los hábitos alimenticios locales.

Por ejemplo, los peces y moluscos tienen niveles relativamente altos de plomo-210 y polonio-210, por lo que las personas que los ingieren en grandes cantidades podrían recibir ciertas dosis mayores a la población que no los consume. Del mismo modo, los habitantes de regiones árticas que consumen grandes cantidades de carne de reno también reciben dosis comparativamente más altas. El reno en dicha zona contiene concentraciones de polonio-210 relativamente altas, acumuladas en el líquen del que se alimentan. UNSCEAR estima que la dosis efectiva promedio por fuentes naturales tanto en alimentos como en bebidas es de 0,3 mSv debido, fundamentalmente, al potasio-40 y a la serie de radionucleidos del uranio-238 y torio-232.

Los productos alimenticios pueden contener radionucleidos de fuentes artificiales y de fuentes naturales. Sin embargo, usualmente la contribución a la dosis al medioambiente debida a las emisiones autorizadas de estos radionucleidos es muy pequeña.

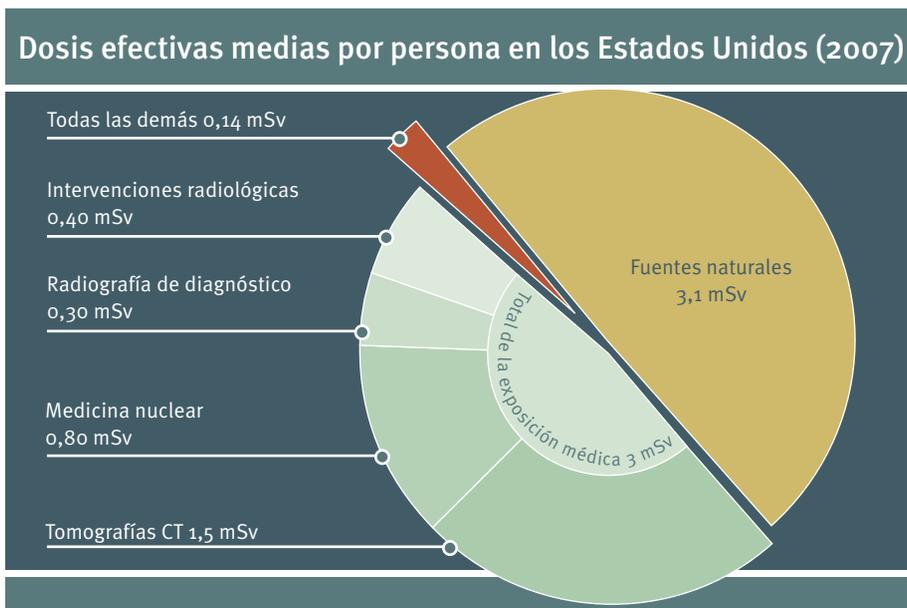
### 3.2. Fuentes artificiales

Los usos de la radiación han aumentado de manera significativa en las últimas décadas, cuando los científicos aprendieron a utilizar la energía del átomo para una amplia variedad de propósitos, desde los militares a las aplicaciones médicas (por ejemplo, el tratamiento del cáncer), y desde la producción de electricidad hasta aplicaciones domésticas (por ejemplo, en detectores de humo). Éstas y otras fuentes artificiales de radiación se suman a la dosis de radiación recibida por las fuentes naturales, individuales y para la población mundial.

Las dosis individuales debidas a las fuentes artificiales de radiación pueden ser muy variables. La mayoría de la población recibe una dosis relativamente pequeña debida a estas fuentes, pero unas pocas personas reciben muchas veces la cantidad promedio. Las fuentes artificiales de radiación generalmente están bien controladas por las medidas de protección a la radiación.

## Aplicaciones médicas

El uso de la radiación en medicina para diagnosticar y tratar ciertas enfermedades juega un papel tan importante que ahora es, con mucho, la principal fuente artificial de exposición en el mundo. En promedio, representa el 98 por ciento de la exposición debida a todas las fuentes artificiales y después de las fuentes naturales, es el segundo mayor contribuyente a la exposición de la población en todo el mundo, lo que representa aproximadamente el 20 por ciento del total. La mayor parte de esta exposición se produce en los países industrializados, donde existen más recursos para la atención médica y, por lo tanto, los equipos de radiología se utilizan mucho más ampliamente. En algunos países, esto incluso ha dado como resultado una dosis efectiva media anual por uso médico que es similar a la recibida por las fuentes naturales.



Existen diferencias sustanciales entre la exposición médica y la mayoría de otros tipos de exposición. La exposición médica generalmente implica sólo una parte del cuerpo, mientras que otros tipos de exposición involucran todo el cuerpo. Además, las edades de los pacientes normalmente se encuentran en un

rango mayor que las de la población en general. Por otra parte, la comparación entre las dosis resultantes de la exposición médica con las debidas a otras fuentes debe hacerse con mucho cuidado, teniendo en cuenta que los pacientes reciben un beneficio directo de su exposición a la radiación.

El aumento de la urbanización, junto con una mejora gradual del nivel de vida, inevitablemente significa que más personas pueden acceder a la asistencia médica. Como consecuencia, la dosis a la población debida a la exposición médica continúa aumentando en todo el mundo. UNSCEAR ha estado recabando periódicamente información sobre los procedimientos diagnósticos y terapéuticos. De acuerdo con la encuesta para el período de 1997 a 2007, alrededor de 3,6 mil millones de procedimientos médicos radiológicos se realizan anualmente en todo el mundo, en comparación con los 2,5 millones efectuados en el período cubierto por de la encuesta anterior, de 1991 a 1996, lo que supone un incremento de casi el 50 por ciento.

Las principales categorías generales de la práctica médica que involucran la radiación son la radiología (que incluye los procedimientos de intervención), la medicina nuclear y la radioterapia. Otros usos, no incluidos en las investigaciones periódicas de UNSCEAR abarcan los programas de cribado médico y la participación voluntaria en programas de investigación médica, biomédica, diagnóstica o terapéutica.

La **Radiología diagnóstica** es el análisis de las imágenes obtenidas por medio de rayos X, tales como en la radiografía simple (por ejemplo, radiografías de tórax o dentales), fluoroscopia (por ejemplo, con papilla o con enema de bario) y la tomografía computarizada (TC). UNSCEAR no analiza las modalidades de imagen que utilizan radiación no ionizante, como son la ecografía o la tomografía de resonancia magnética. La **Radiología intervencionista** utiliza procedimientos mínimamente invasivos, guiados por imágenes, para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades (por ejemplo, para guiar un catéter en un vaso sanguíneo).

Debido a la mayor utilización de la TC y a que la dosis recibida por cada examen es considerable, la dosis efectiva media global de los procedimientos de diagnóstico radiológicos casi se duplicó, de 0,35 mSv en 1988 a 0,62 mSv en el año 2007. De acuerdo con el estudio más reciente de UNSCEAR, la TC representa actualmente el 43 por ciento de la dosis colectiva total debida a los procedimientos radiológicos. Estos números varían de una región a otra. Alrededor de dos tercios de todos los procedimientos radiológicos son recibidos por el 25 por ciento de la población mundial, que vive en los países industrializados. Para el restante 75 por ciento de la población mundial, la frecuencia anual de los procedimientos se ha mantenido estable, incluso para los exámenes de rayos X dentales simples.

## Exposición mundial causada por la radiología (1988–2008)



La **medicina nuclear** es la introducción de sustancias radiactivas *no selladas* (esto es, que son solubles, y no encapsuladas) en el cuerpo, principalmente para obtener imágenes que proporcionan información sobre la estructura o la función de un órgano y menos frecuentemente utilizados para tratar ciertas enfermedades, como el hipertiroidismo y el cáncer de tiroides. Generalmente, un radionúclido se modifica químicamente para formar un radiofármaco que generalmente se administra por vía intravenosa o por vía oral. El radiofármaco

## Exposición mundial causada por la medicina nuclear (1988–2008)



se dispersa en el cuerpo de acuerdo a sus características físicas o químicas, lo que hace posible el análisis. Por lo tanto, la radiación emitida por el radionúclido dentro del cuerpo se analiza, para producir imágenes de diagnóstico o se usa para tratar enfermedades.

El número de procedimientos de diagnóstico de medicina nuclear en todo el mundo aumentó de alrededor de 24 millones en 1988 a cerca de 33 millones en 2007. Esto produjo un aumento significativo de la dosis efectiva colectiva anual, de 74 000 a 202 000 Sv-persona. Las aplicaciones terapéuticas modernas de medicina nuclear también están aumentando, alcanzando unos 0,9 millones de pacientes cada año en todo el mundo. Una vez más, el uso de la medicina nuclear es muy desigual, el 90 por ciento de los exámenes se realizan en los países industrializados.

La **terapia con radiación** (también llamada **radioterapia**) usa la radiación para el tratamiento de diversas enfermedades, por lo general el cáncer, aunque también para tratar tumores benignos. La radioterapia externa se refiere al tratamiento usando una fuente de radiación que está fuera del cuerpo del paciente, y se llama **teleterapia**. Para esto se utiliza una máquina que contiene una fuente de radiación de alta actividad (por lo general cobalto-60), o se usa una máquina de alto voltaje que produce la radiación (por ejemplo, un acelerador lineal). El tratamiento también puede realizarse colocando fuentes radiactivas metálicas o selladas, de forma temporal o permanente, dentro del cuerpo del paciente; esto se llama **braquiterapia**.

A nivel mundial, se estima que 5,1 millones de pacientes fueron tratados anualmente con radioterapia durante el período de 1997 a 2007, frente a un estimado de 4,3 millones en 1988. Alrededor de 4,7 millones fueron tratados mediante teleterapia y 0,4 millones con braquiterapia. El 25 por ciento de la población mundial, que vive en los países industrializados, recibió el 70 por ciento de los tratamientos de radioterapia y el 40 por ciento de todos los procedimientos de braquiterapia realizados en todo el mundo.

## EXPOSICIÓN EN EL ÁREA DE TRABAJO

---

Debido a que el número total de procedimientos radiológicos médicos ha aumentado significativamente en las últimas décadas, también lo ha hecho el número de trabajadores de la salud involucrados, rebasando los 7 millones, con una dosis efectiva anual promedio de alrededor de 0,5 mSv por trabajador. En la radiología intervencionista y medicina nuclear, el personal médico podría recibir dosis superiores a la media.

## *Accidentes en aplicaciones médicas*

Algunas aplicaciones médicas de la radiación (por ejemplo, la radioterapia, la radiología intervencionista y la medicina nuclear) implican la administración de dosis altas a los pacientes. Cuando se aplica de forma incorrecta, puede causar daños graves o incluso la muerte. Las personas en riesgo incluyen no sólo a los pacientes, sino también a los médicos y demás personal cercano. El error humano ha sido la causa más común de estos accidentes. Algunos ejemplos son la administración de una dosis incorrecta debido a errores de planificación del tratamiento, no utilizar los equipos adecuadamente, la exposición al órgano equivocado o, en ocasiones incluso al paciente equivocado.

A pesar de que los accidentes de radioterapia graves son poco frecuentes, se han registrado más de 100. UNSCEAR ha analizado 29 accidentes registrados desde 1967 que causaron 45 muertes y 613 heridos. Sin embargo, es probable que no se hayan reportado algunas muertes y numerosas lesiones.

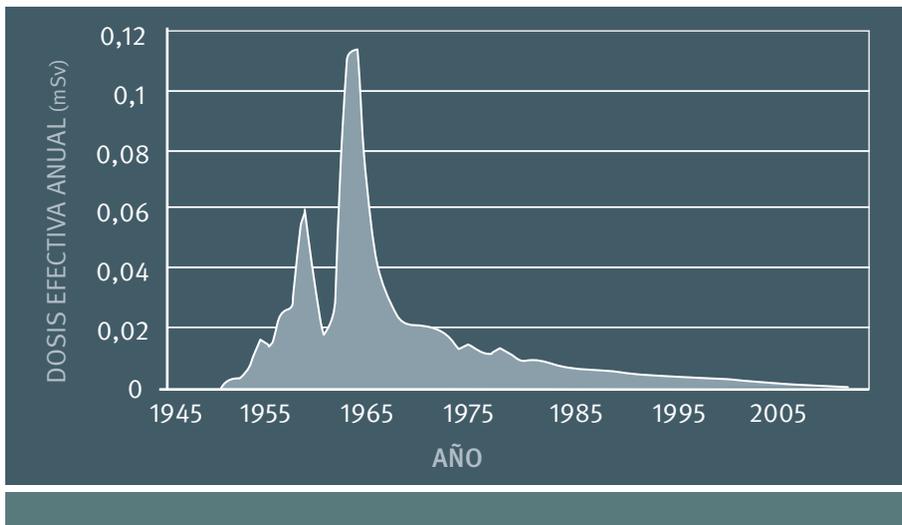
No sólo la sobreexposición, también la subexposición puede tener serias consecuencias, cuando los pacientes reciben dosis de radiación insuficiente para tratar una enfermedad que amenaza la vida. Los programas de garantía de calidad ayudan a mantener las prácticas con estándares altos y consistentes con el fin de minimizar el riesgo de accidentes de este tipo.

## **Armas nucleares**

En 1945, durante la etapa final de la Segunda Guerra Mundial, dos bombas atómicas fueron lanzadas sobre ciudades japonesas —Hiroshima el 6 de agosto y Nagasaki el 9 de agosto. Las explosiones de las dos bombas mataron a cerca de 130 000 personas. Estos eventos fueron la única vez en la historia que se usaron armas nucleares para la guerra. Sin embargo, después de 1945, muchas armas nucleares fueron probadas en la atmósfera, sobre todo en el hemisferio norte. El período de prueba más activo fue entre 1952 y 1962. En total, se realizaron más de 500 ensayos, con una potencia total al equivalente de 430 megatonnes de trinitrotolueno (TNT), el último realizado en 1980. Las personas en todo el mundo fueron expuestas a la radiación debida a la caída (lluvia) de material radiactivo proveniente de estos ensayos nucleares. En respuesta a la preocupación por la exposición a la radiación de los seres humanos y el medioambiente, se estableció en 1955 UNSCEAR.

La mayor dosis media efectiva anual estimada debida a la caída (lluvia) de material radiactivo proveniente de los ensayos atmosféricos de armas nucleares se presentó en 1963, con 0,11 mSv, y posteriormente descendió a su nivel actual de alrededor de 0,005 mSv. Esta exposición se reducirá muy lentamente en el futuro, ya que la mayor parte se debe al radionúclido carbono-14, que tiene un período de semidesintegración muy largo.

## Dosis media mundial por persona de radiactividad residual de ensayos nucleares



Alrededor del 50 por ciento del total del material radiactivo producido por las pruebas nucleares superficiales se depositó localmente, dentro de los 100 km de la zona de prueba. Las personas que vivían cerca de los sitios de prueba fueron quienes esencialmente estuvieron expuestos a esta radiación. Sin embargo, debido a que las pruebas se realizaron en áreas relativamente remotas, las poblaciones locales expuestas eran pequeñas y no contribuyeron de manera significativa a la dosis colectiva global. Sin embargo, las personas que vivieron en la zona hacia donde se dirigía el viento procedente de los sitios de ensayo recibieron dosis mucho más altas que el promedio.

El primer informe de UNSCEAR en 1958 estableció las bases científicas sobre las que se negoció el *Tratado de Prohibición de los Ensayos Nucleares en la Atmósfera, el Espacio Exterior y bajo el Agua*. Después de la firma en 1963 del Tratado de Prohibición Parcial de Ensayos, se realizaron cerca de 50 pruebas subterráneas hasta la década de los 90; se realizaron algunos pocos ensayos después de eso. La mayoría de estos ensayos tenían un rendimiento nuclear mucho más bajo que las pruebas atmosféricas y los residuos radiactivos generalmente fueron retenidos, excepto los gases que fueron liberados a la atmósfera. Aunque los ensayos nucleares generan una gran cantidad de residuos radiactivos, no se espera que se exponga al público, ya que se realizan a gran profundidad y básicamente se funden con la roca del sitio.

Existe preocupación acerca de la reutilización de las áreas donde se realizaron ensayos nucleares (por ejemplo, para el pastoreo o la agricultura), porque algunas están siendo utilizados de nuevo. La dosis debida a los residuos radiactivos en

algunos sitios, por ejemplo, en áreas localizadas en el emplazamiento de ensayos nucleares de Semipalatinsk en la actual Kazajstán, puede ser considerable, mientras que, en otros lugares, como en los Atolones Mururoa y Fangataufa en la Polinesia Francesa, la dosis no contribuiría más que en una fracción de la exposición normal de fondo a la población que eventualmente ocupara la zona. Para otros sitios, como en las Islas Marshall y Maralinga, donde los Estados Unidos y el Reino Unido, respectivamente, llevaron a cabo algunos de sus ensayos nucleares, la exposición de la población que vive allí dependería de la dieta y del estilo de vida.

## Reactores Nucleares

Cuando ciertos isótopos de uranio o plutonio son golpeados por neutrones, el núcleo se divide en dos núcleos más pequeños mediante un proceso llamado fisión nuclear, la cual libera energía y dos o más neutrones. Los neutrones liberados también pueden golpear a otros núcleos de uranio o plutonio y hacer que se dividan, liberando más neutrones, los que a su vez pueden dividir más núcleos. Esto se conoce como una reacción en cadena. Estos isótopos se utilizan normalmente como combustible en los reactores nucleares, donde la reacción en cadena se controla para detenerla si ocurre muy rápidamente.

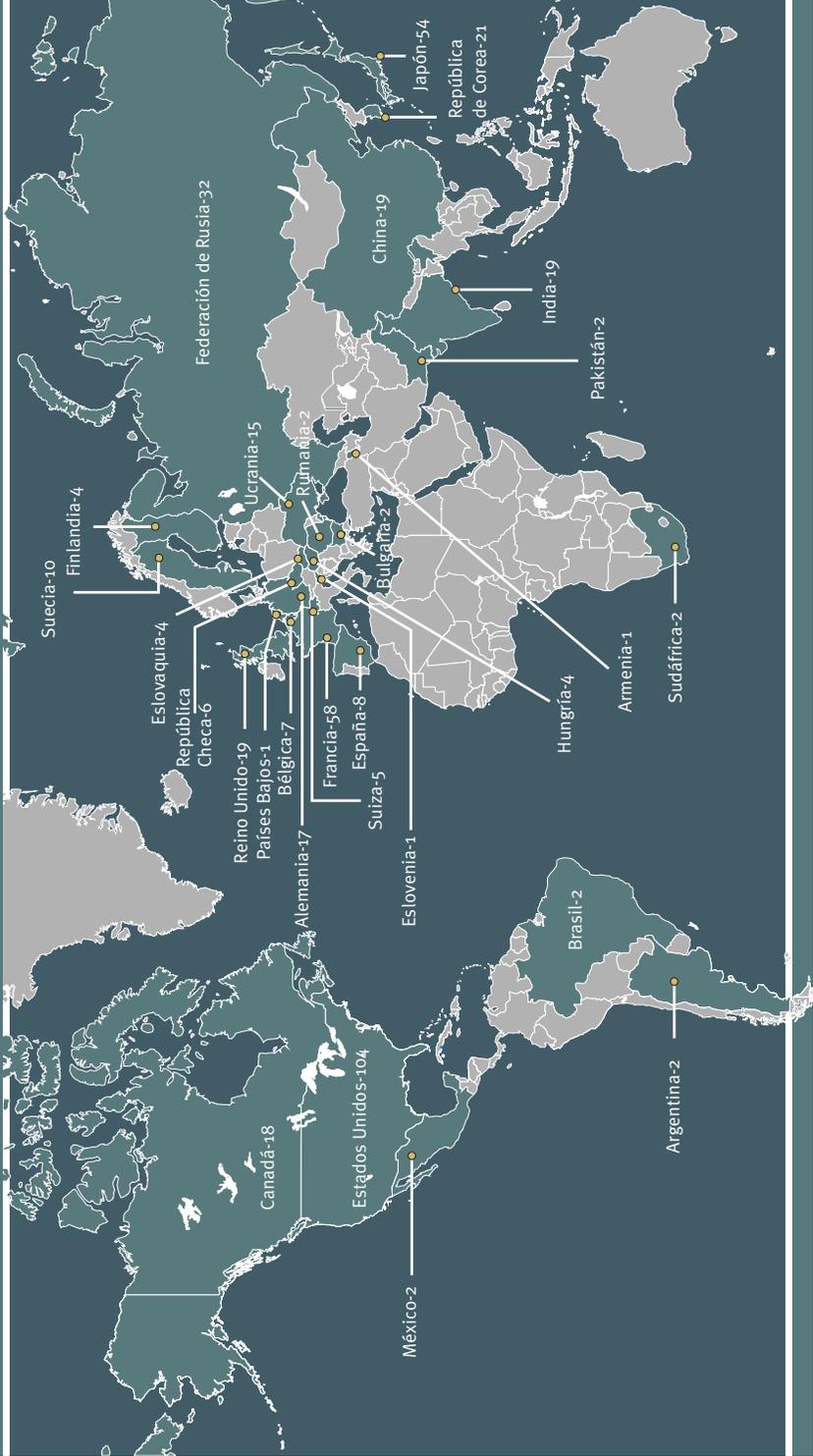
La energía liberada por la fisión en los reactores nucleares se puede utilizar para producir electricidad en las centrales nucleares. Sin embargo, también existen reactores de investigación para realizar pruebas de combustible nuclear y de varios tipos de materiales, para investigaciones de física nuclear y de biología, y para la producción de los radionucleidos utilizados en la medicina y la industria. Aunque existen diferencias entre los dos tipos de reactores, ambos requieren de procesos industriales como la minería de uranio y la eliminación de los desechos radiactivos, lo que puede producir exposición de los trabajadores y del público.

### *Centrales nucleares*

La primera central nuclear comercial del mundo a escala industrial, Calder Hall, fue construida en 1956 en el Reino Unido, y desde entonces, la generación de energía eléctrica mediante centrales nucleares ha crecido considerablemente. A pesar de que ha aumentado el desmantelamiento de los reactores más antiguos, la producción de energía eléctrica de origen nuclear sigue creciendo. A finales de 2010, alrededor de 440 reactores de potencia estaban en funcionamiento en 29 países, y proporcionaban alrededor del 10 por ciento de la producción mundial de electricidad; existían 240 reactores de investigación, distribuidos en 56 países en el mundo.

A pesar de que la producción de electricidad mediante la utilización de la energía nuclear es a menudo controvertida, durante su operación normal contribuye muy poco a la exposición global a la radiación. Por otra parte, los niveles de exposición a la radiación varían mucho de un tipo de instalación a otra, entre distintas ubicaciones y a lo largo del tiempo.

## Centrales de energía nuclear en todo el mundo (2010)



Los niveles generales de exposición debido a las descargas normales de los reactores al medioambiente han tendido a disminuir a pesar del aumento de la producción eléctrica de las plantas. Esto se debe en parte a las mejoras en la tecnología y en parte debido a las medidas de protección radiológica más estrictas. En general, los efluentes procedentes de instalaciones nucleares ocasionan dosis muy bajas de radiación. La dosis colectiva anual de las poblaciones que residen alrededor de las centrales nucleares se estima en 75 Sv-persona. De este modo, una persona que vive en los alrededores de una central nuclear se expone en promedio a una dosis efectiva anual de alrededor de 0,0001 mSv.

El principal componente para la exposición a la radiación de las operaciones de energía nuclear es la minería. La minería y el tratamiento del uranio producen grandes cantidades de residuos en forma de colas, que contienen niveles elevados de radionucleidos naturales. Para el año 2003, la producción total mundial alcanzó cerca de dos millones de toneladas, mientras que los residuos resultantes ascendieron a más de dos mil millones de toneladas. Actualmente los residuos se almacenan correctamente, pero existen muchos emplazamientos antiguos y abandonados, y sólo unos pocos han sido rescatados. UNSCEAR estimó la dosis colectiva actual anual de los grupos de población alrededor de los emplazamientos de las minas y plantas de tratamiento, y de los diques de estériles en alrededor de 50 a 60 Sv-persona.

El combustible gastado de los reactores puede ser reprocesado para recuperar el uranio y el plutonio para su reutilización. Actualmente, la mayor parte del combustible gastado se mantiene en almacenamiento provisional, pero alrededor de un tercio de lo producido hasta ahora ha sido reprocesado. Se estima que la dosis colectiva anual debida al reprocesado es del orden de 20 a 30 Sv-persona.

Los residuos de baja actividad y algunos de actividad media actualmente se almacenan de forma definitiva en instalaciones cercanas a la superficie, aunque en el pasado algunos fueron vertidos al mar. Tanto los residuos de alta actividad procedentes del reprocesado como el combustible gastado (si no es reprocesado) son almacenados temporalmente pero finalmente se requerirá su almacenamiento definitivo. El adecuado almacenamiento definitivo de los residuos no debe dar lugar a la exposición de las personas, incluso en un futuro lejano.

## EXPOSICIÓN EN EL ÁREA DE TRABAJO

---

En la industria nuclear, la liberación de radón en las minas subterráneas de uranio tiene una contribución sustancial a la exposición ocupacional. La extracción y procesamiento de minerales radiactivos que pueden contener altos niveles de radionucleidos es una actividad muy extendida. La dosis efectiva anual media por trabajador en la industria nuclear ha disminuido gradualmente desde la década de los 70, de 4,4 mSv a 1 mSv en la actualidad. Esto se debe principalmente a una reducción significativa en la extracción de uranio, junto con técnicas de minería más avanzadas y ventilación.

## Procesos principales en la industria nuclear

La conversión, el enriquecimiento y la refinación preparan el uranio para utilizarlo como combustible.

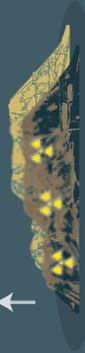


La fabricación de combustible produce varillas de combustible, generalmente de uranio en pastillas de cerámica, que se introducen en tubos metálicos.



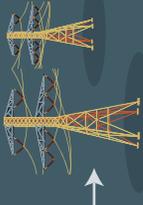
Al reprocesar el uranio y el plutonio del combustible gastado se puede reciclarlos como combustible después de su conversión y enriquecimiento.

Mediante la molienda se extrae uranio del mineral de uranio. Los residuos se convierten en colas que contienen radionucleidos de período largo en concentraciones bajas.



El uranio natural se extrae principalmente mediante minería a cielo abierto o subterránea.

Reactores nucleares para la generación de energía o de investigación, donde los núcleos de átomos de uranio se fisionan y liberan energía que se utiliza para calentar agua.

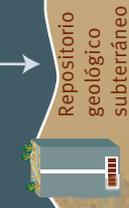


El material radiactivo resultante de reacciones nucleares resta eficiencia al combustible. Transcurridos 12 a 24 meses el combustible gastado se elimina del reactor.

Los radioisótopos producidos en los reactores pueden separarse para utilizarlos en la medicina y la industria.



Los residuos de actividad alta, como el combustible gastado, se envían actualmente a recintos de almacenamiento provisional en espera de su disposición final en emplazamientos geológicos a gran profundidad.



Repositorio geológico subterráneo

Los residuos de actividad baja y media se eliminan principalmente en vertederos cercanos a la superficie.



Recintos de almacenamiento en la superficie

Profundidad baja e intermedia



## *Accidentes en instalaciones nucleares*

Los niveles de exposición durante la operación normal de las instalaciones civiles de la industria nuclear son muy bajos. Sin embargo, ha habido algunos accidentes graves, que recibieron amplia atención del público y cuyas consecuencias han sido revisadas por UNSCEAR. Algunos ejemplos son la instalación de investigación Vinca en la antigua Yugoslavia en 1958, la central nuclear de Three Mile Island en los Estados Unidos en 1979, y la planta de tratamiento de combustible en Tokai-Mura en Japón en 1999.

Entre 1945 y 2007, treinta y cinco accidentes de radiación severos en las instalaciones nucleares provocaron la muerte o lesiones graves a los empleados; y siete accidentes causaron liberaciones de material radiactivo fuera del emplazamiento, y exposición detectable de la población. También hubo accidentes graves en instalaciones relacionadas con los programas de armas nucleares. Sin incluir los accidentes de Chernobyl en 1986 y el de Fukushima-Daiichi en 2011 —que son discutidos a continuación— se registraron 32 muertes y 61 casos de lesiones relacionadas con la radiación que requirieron atención médica.

El accidente más grave en una instalación civil antes de sucediera el accidente de Chernobyl ocurrió en la central nuclear de Three Mile Island, el 28 de marzo de 1979. Una serie de eventos condujo a la fusión parcial del núcleo del reactor. Este accidente liberó grandes cantidades de productos de fisión y radionucleidos provenientes del núcleo del reactor dañado al edificio de contención, pero se liberó relativamente poco al medioambiente, por lo que la exposición resultante del público fue muy baja.

### *Accidente de la Central Nuclear de Chernobyl*

El accidente en la central nuclear de Chernobyl el 26 de abril 1986 fue no sólo el más grave en la historia de la energía nuclear civil, sino también el más grave en términos de exposición a la radiación de la población en general. La dosis colectiva resultante del accidente fue muchas veces mayor que la dosis colectiva combinada de todos los demás accidentes de radiación.

Dos trabajadores murieron a causa de las lesiones en el período inmediatamente posterior, y 134 sufrieron el síndrome de radiación aguda, que resultó fatal para 28 de ellos. Las lesiones de piel y cataratas producidas por la radiación fueron algunos de los principales problemas para los supervivientes. Además de los trabajadores de emergencia, varios cientos de miles de personas participaron posteriormente en las operaciones de recuperación. Aparte de un evidente

aumento en la aparición de la leucemia y de cataratas entre quienes recibieron dosis altas en 1986 y 1987, no hay ninguna evidencia consistente hasta la fecha de otros efectos sobre la salud de este grupo, relacionados con la radiación.

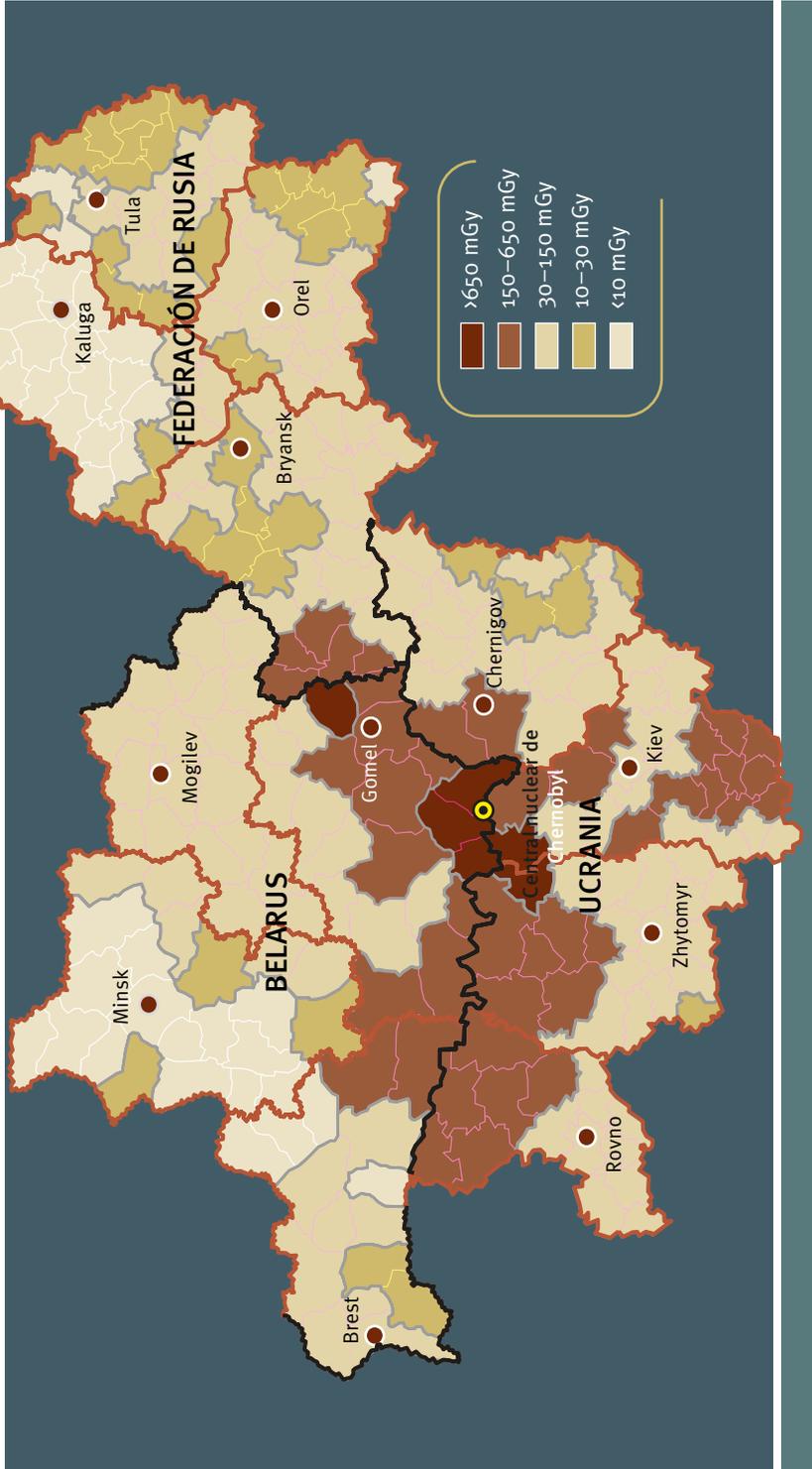
El accidente causó la mayor liberación radiactiva no controlada al medioambiente que se haya registrado para cualquier operación civil; fueron liberadas a la atmósfera grandes cantidades de sustancias radiactivas, durante aproximadamente 10 días. La nube radiactiva creada por el accidente se dispersó en todo el hemisferio norte, y depositó cantidades considerables de material radiactivo en extensas áreas de la antigua Unión Soviética y otras partes de Europa, contaminando la tierra y el agua, particularmente en la actual Bielorrusia, la Federación de Rusia y Ucrania, y causando graves trastornos sociales y económicos a grandes segmentos de la población.

La contaminación de leche fresca con el radionucleido yodo-131, de vida corta (con periodo de semidesintegración de ocho días), y la falta de aplicación rápida de medidas de protección, produjo dosis muy altas a la tiroides, especialmente en los niños, en algunas zonas de la antigua Unión Soviética. Desde principios de la década de los 90, la incidencia de cáncer de tiroides entre las personas que se expusieron cuando eran niños o adolescentes en 1986, se ha incrementado en Bielorrusia, Ucrania y cuatro de las regiones más afectadas de la Federación de Rusia. Para el período 1991 a 2005, se han reportado más de 6 000 casos; de éstos, 15 casos han resultado mortales.

A largo plazo, la población en general también estuvo expuesta a la radiación, tanto externa, debida a los depósitos radiactivos, como interna, originada por consumir alimentos contaminados, principalmente con cesio-137 (con un periodo de semidesintegración de 30 años). Sin embargo, la dosis de radiación a largo plazo fue relativamente baja; durante el período de 1986 a 2005 en las zonas contaminadas de Bielorrusia, la Federación de Rusia y Ucrania, la dosis efectiva individual promedio fue de 9 mSv. No es probable que esta dosis conduzca a efectos importantes para la salud de la población en general; sin embargo, los graves trastornos causados por el accidente han producido un gran impacto social y económico y una gran preocupación de las poblaciones afectadas.

UNSCEAR estudió detalladamente las consecuencias radiológicas del accidente en varios informes. La comunidad internacional ha hecho esfuerzos sin precedentes para evaluar la magnitud y las características de las consecuencias del accidente, en general y en diferentes áreas de interés, con el fin de mejorar la comprensión de las consecuencias del accidente, radiológicas y de otro tipo, y contribuir a su mitigación.

## Dosis medias en la tiroides tras el accidente en la central nuclear de Chernobyl



Esencialmente, los estudios realizados desde 1986 indicaron que las personas que estuvieron expuestas cuando eran niños al yodo-131, los trabajadores de emergencia, y los trabajadores de operaciones de recuperación que recibieron altas dosis de radiación tienen mayor riesgo de experimentar efectos inducidos por la radiación. Sin embargo, la mayoría de los residentes de la zona fueron expuestos a bajos niveles de radiación, comparables o unas pocas veces más altos, que el nivel anual de radiación natural de fondo.

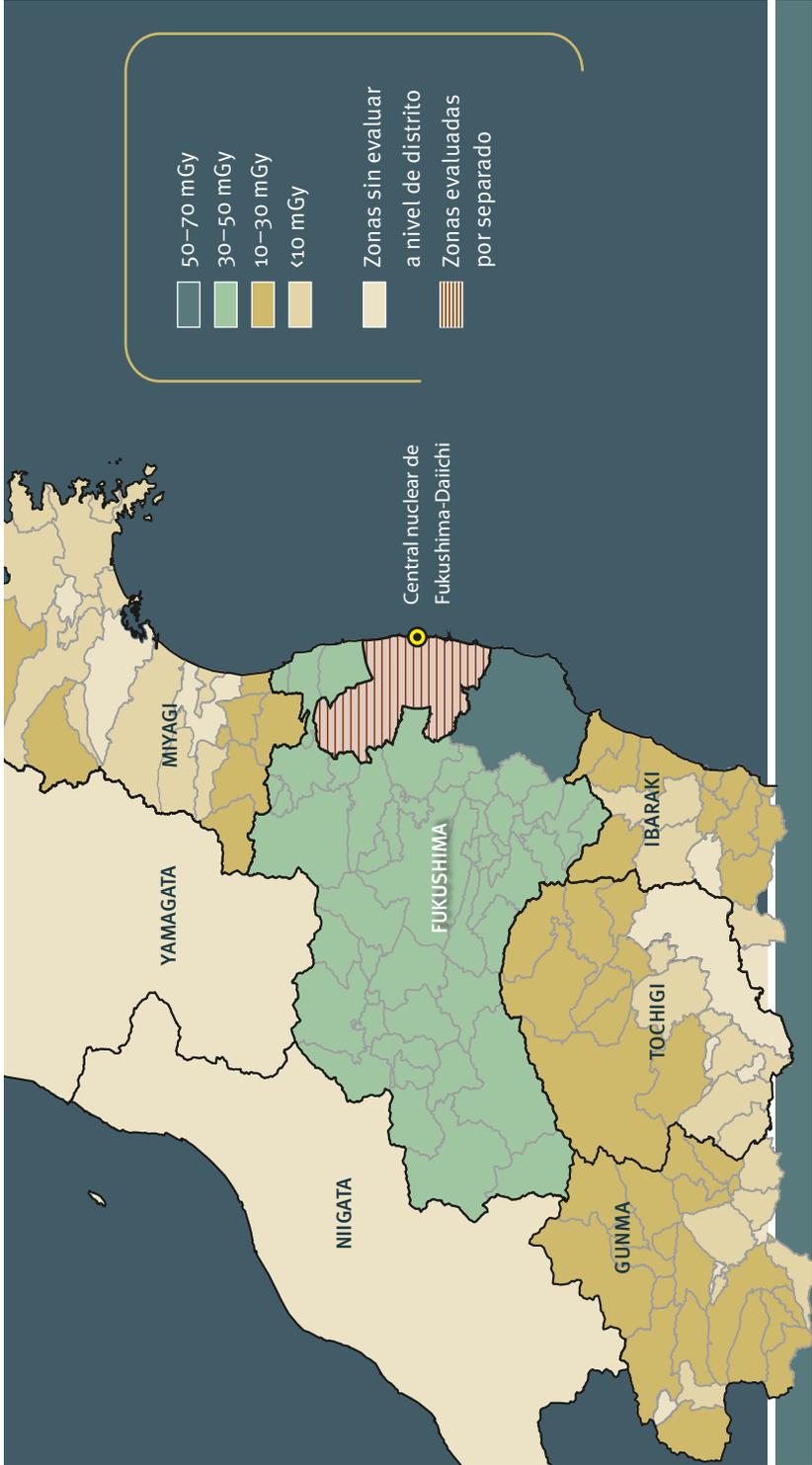
### *Accidente de la central nuclear de Fukushima-Daiichi*

Después del gran terremoto de magnitud 9,0 en el este de Japón, y el tsunami de la costa este del norte de Japón, ocurridos el 11 de marzo de 2011, la central nuclear de Fukushima-Daiichi fue severamente dañada, y fue liberado al medioambiente material radiactivo. Aproximadamente 85 000 residentes dentro de la zona de 20 km alrededor del emplazamiento de la central nuclear y algunas zonas cercanas fueron evacuados como medida de precaución, entre el 11 y el 15 de marzo, mientras que los residentes que vivían entre los 20 a los 30 km de la central se resguardaron en sus propios hogares. Más tarde, en abril de 2011, se recomendó la evacuación de otras 10 000 personas que vivían más al noroeste de la central, debido a los niveles elevados de radionucleidos en el suelo. Estas movilizaciones redujeron en gran medida los niveles de exposición que habrían sido recibidos por los afectados. El consumo de agua y algunos productos alimenticios se restringió temporalmente para limitar la exposición a la radiación del público. Durante el manejo de la emergencia en la central nuclear, se expuso a la radiación el equipo de operaciones y el personal de respuesta de emergencias.

UNSCEAR llevó a cabo una estimación de las dosis de radiación y de los efectos asociados sobre la salud y el medioambiente. Cerca de 25 000 trabajadores participaron en la mitigación y otras actividades en el emplazamiento de la central nuclear de Fukushima-Daiichi durante el primer año y medio después del accidente. La dosis efectiva media a estos trabajadores en ese momento era de alrededor de 12 mSv. Sin embargo, 6 trabajadores recibieron dosis totales acumuladas de más de 250 mSv; la dosis total más alta registrada fue de 680 mSv para un trabajador, debida principalmente a exposición interna (aprox. el 90 por ciento). Se estimó que la dosis a tiroides recibida por doce trabajadores estuvo en el rango de 2 a 12 Gy. No se observaron muertes relacionadas con la radiación, o enfermedades agudas entre los trabajadores expuestos a la radiación debidas al accidente.

Las dosis efectivas promedio de los adultos en las zonas evacuadas de la Prefectura de Fukushima variaron desde 1 mSv hasta aproximadamente 10 mSv, en el primer año después del accidente. Las dosis efectivas para bebés de un año de edad se estimaron en aprox. el doble. Para las zonas de la Prefectura de Fukushima que no fueron evacuadas y para las prefecturas vecinas, las dosis fueron menores.

## Dosis medias en la tiroides de lactantes tras el accidente en la central nuclear de Fukushima-Daiichi



Las estimaciones de las dosis medias a la tiroides de las personas más expuestas, debidas principalmente al yodo-131, variaron desde 35 mGy para los adultos y hasta 80 mGy para bebés de un año de edad. La dosis anual a tiroides, debida principalmente a fuentes naturales de radiación externa, es típicamente de alrededor de 1 mGy. UNSCEAR concluyó como una posibilidad teórica, que el riesgo de cáncer de tiroides entre el grupo de niños más expuestos a la radiación podría aumentar. Sin embargo, el cáncer de tiroides es una enfermedad rara entre los niños pequeños, por lo que se espera que estadísticamente no haya efectos observables en este grupo.

Aunque se hacen comparaciones con la catástrofe de Chernobyl, el accidente nuclear de Fukushima-Daiichi fue diferente en términos del tipo de reactor, la forma en que ocurrió el accidente, las características de las emisiones de radionucleidos y su dispersión, y las acciones de protección adoptadas. En ambos casos, grandes cantidades de yodo-131 y cesio-137 -los dos radionucleidos más significativos desde el punto de vista de la exposición después de los accidentes nucleares-, fueron liberadas al medioambiente. Las liberaciones de yodo-131 y cesio-137 debidas al accidente de Fukushima-Daiichi, comparadas con las de Chernobyl, fueron aproximadamente el 10 y del 20 por ciento, respectivamente.

## Aplicaciones industriales y otras aplicaciones

Las fuentes de radiación se utilizan en una amplia gama de aplicaciones industriales. Éstas incluyen la irradiación industrial, usada para la esterilización de productos médicos y farmacéuticos, para la conservación de los alimentos y para la erradicación de plagas de insectos; la radiografía industrial, que es utilizada para examinar si hay defectos de las uniones metálicas soldadas; los emisores alfa o beta, que se utilizan en compuestos luminiscentes para las miras de armas, y como fuentes de luz de bajo nivel en señales de salida de emergencia, e iluminación de mapas; las fuentes radiactivas o máquinas de rayos X en miniatura utilizados en la excavación de pozos, para medir las características geológicas de los pozos perforados, para la exploración de gas y petróleo; las fuentes radiactivas utilizadas en los dispositivos de medición de espesores, humedad, densidad y niveles de materiales; y otras fuentes radiactivas selladas utilizadas en la investigación.

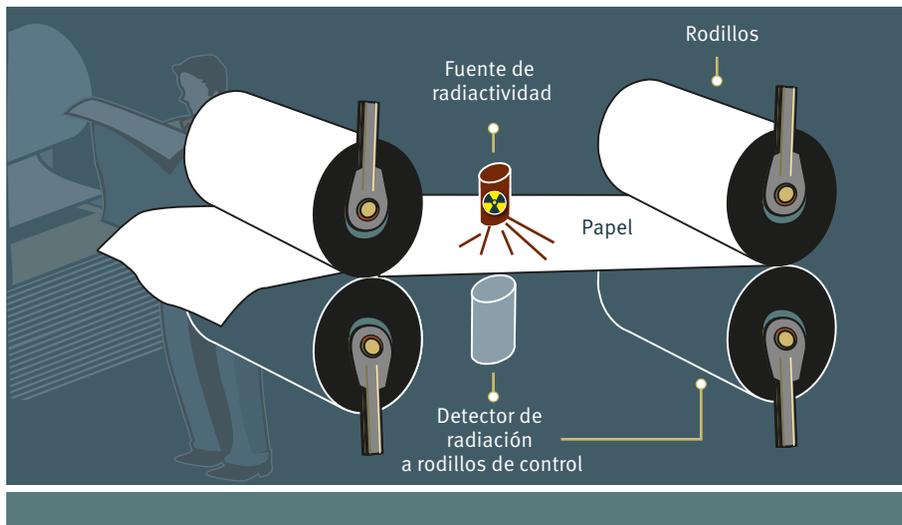
Aunque generalizada, la producción de radionucleidos para su uso en las prácticas industriales y médicas produce niveles muy bajos de exposición del público en general. Sin embargo, en caso de accidentes, pueden contaminarse áreas más localizadas, y originar altos niveles de exposición.

### EXPOSICIÓN EN EL ÁREA DE TRABAJO

---

El número de trabajadores involucrados en los usos industriales de la radiación fue de aproximadamente un millón en la década del 2000, con una dosis efectiva media anual de 0,3 mSv por trabajador.

## Dispositivo de medición de espesores por medio de radiación



### *Materiales radiactivos naturales (NORM)*

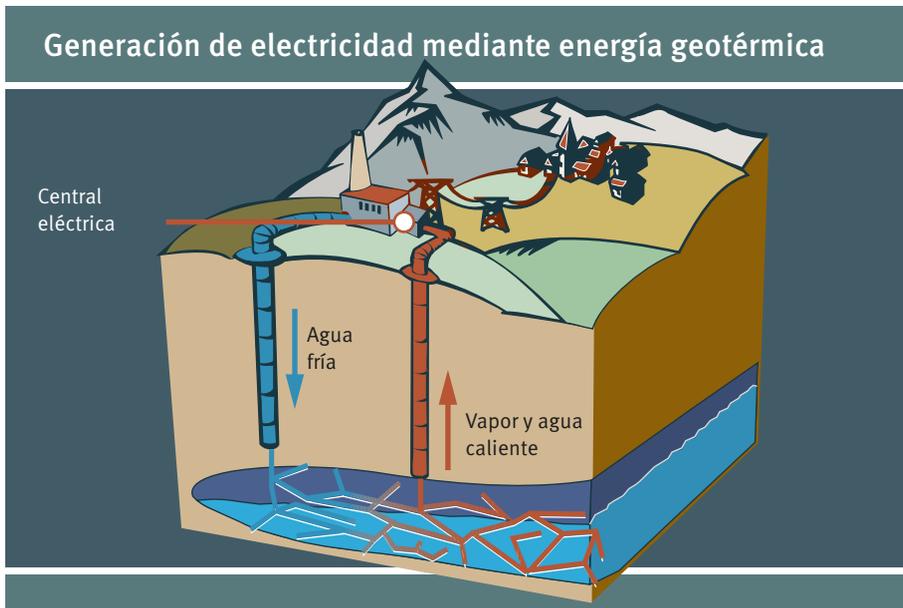
Hay algunos tipos de instalaciones en todo el mundo que, si bien no guardan relación con el uso de la energía nuclear, pueden exponer a la población a la radiación debido al aumento de las concentraciones de materiales radiactivos naturales (NORM) en sus productos industriales, subproductos y residuos. La más importante de estas instalaciones involucra a la minería y el procesamiento de minerales.

Las actividades relacionadas con la extracción y el procesamiento de minerales también pueden incrementar los niveles de NORM. Estas actividades incluyen la minería y fundición de metales; la producción de fosfatos; la minería de carbón y la generación de energía a partir de la combustión del carbón; la extracción de petróleo y gas; la industria del óxido de titanio y tierras raras; la industria del circonio y la cerámica; y las aplicaciones que utilizan radionucleidos de origen natural (por lo general isótopos de radio y de torio).

El carbón, por ejemplo, contiene trazas de radionucleido elementales. La combustión libera estos radionucleidos al medioambiente donde pueden producir exposición de las personas. Esto significa que por cada gigavatio-año de energía eléctrica producida por las centrales eléctricas a base de carbón del mundo, se calcula que la dosis colectiva de la población mundial aumenta alrededor de 20 Sv-persona anualmente. Además, las cenizas volantes (un residuo generado en la combustión) se han utilizado como material de relleno y en la construcción de carreteras, pero su utilización en la construcción de edificios causa exposición

a la radiación, tanto por irradiación directa como por inhalación de radón. Por otra parte, la disposición de cenizas volantes puede aumentar los niveles de exposición a la radiación en los alrededores de los vertederos.

La generación de electricidad mediante la energía geotérmica es otra fuente de exposición a la radiación del público en general. Los depósitos subterráneos de vapor y agua caliente son aprovechados para generar electricidad o para la calefacción de los edificios. Las estimaciones de las emisiones procedentes de la utilización de esta tecnología en Italia y los Estados Unidos, sugieren que se produce alrededor del 10 por ciento de la dosis colectiva anual por gigavatio-año de electricidad producida por las centrales eléctricas de carbón. La energía geotérmica actualmente tiene una contribución relativamente pequeña a la producción mundial de energía y, por lo tanto, a la exposición a la radiación.



Otras prácticas humanas, como los lodos provenientes del tratamiento del agua utilizada en la agricultura, pueden exponer a las personas a los materiales radiactivos naturales (NORM). Sin embargo, los niveles de exposición al público son extremadamente bajos, del orden de menos de unas pocas milésimas de milisievert al año.

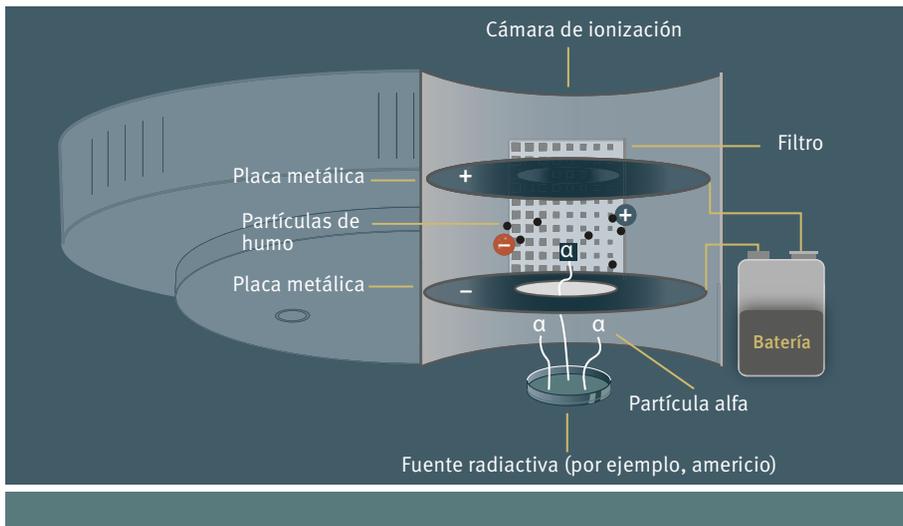
Un subproducto del enriquecimiento de uranio es el uranio empobrecido, que es menos radiactivo que el uranio natural. El uranio empobrecido se ha utilizado durante muchos años tanto para fines civiles como militares. Debido a su alta densidad, se utiliza como blindaje contra la radiación o como contrapeso en los aviones. El uso militar del uranio empobrecido, especialmente en munición perforante,

ha aumentado la preocupación acerca de la contaminación residual. A excepción de algunos casos específicos, tales como el manejo durante largos periodos, la exposición a la radiación del uranio empobrecido es extremadamente baja. De hecho, la toxicidad química es su propiedad más peligrosa.

### *Productos de consumo*

Un número de productos adquiridos para el uso diario contienen bajos niveles de radionucleidos, añadidos deliberadamente con el fin de hacer uso de sus propiedades radiactivas o químicas. Históricamente, el radionucleido más significativo para su uso en productos de consumo luminosos era el radio-226. Su uso finalizó hace varias décadas, siendo reemplazado por el prometio-147 y el hidrógeno-3 (tritio), que son menos radiotóxicos. Aún así, en los relojes o diales que contienen compuestos de tritio, puede ocurrir alguna fuga, ya que el tritio es muy volátil. Sin embargo, el tritio emite sólo partículas beta muy débiles que no pueden penetrar la piel, por lo que se expondrá a las personas solamente si el tritio entra en el cuerpo.

### Uso de fuente radiactiva en detector de humo



Algunos detectores de humo modernos consisten en cámaras de ionización con pequeñas láminas de americio-241, que son emisoras de partículas alfa, y producen una corriente constante de iones. El aire del entorno entra libremente a los detectores; si entra humo en el detector, se interrumpe la corriente, activando una alarma.

La radiactividad de la fuente de americio en un detector de humo es muy baja. El americio se desintegra muy lentamente, con un periodo de semidesintegración de alrededor de 432 años. Esto significa que un detector —al final de 10 años

de uso— esencialmente retiene toda su actividad original. Mientras la fuente de americio permanezca en el detector, la exposición sería insignificante. Aunque detectables con equipos sensibles, los niveles de exposición recibidos de estos productos son extremadamente bajos. Una persona que permanezca a dos metros de distancia del detector durante ocho horas al día, se estima que recibirá una dosis menor a 0,0001 mSv al año.

### *Accidentes industriales*

Los accidentes relacionados con las fuentes radiactivas industriales ocurren más frecuentemente que los de las centrales nucleares. Sin embargo, normalmente no reciben tanta atención a pesar de que pueden provocar gran exposición a la radiación, tanto de los trabajadores como de los miembros del público.

Entre 1945 y 2007, se han reportado alrededor de 80 accidentes en las instalaciones industriales que utilizan fuentes de radiación, aceleradores o equipos de rayos X. Se registraron nueve muertes debidas a estos accidentes, y 120 trabajadores resultaron heridos. Algunos trabajadores lesionados presentaron el síndrome de radiación aguda. Las manos fueron una zona común de lesiones, y a menudo tuvieron que ser amputadas. UNSCEAR considera que es probable que algunos accidentes en instalaciones industriales, que involucraran muertos o heridos, no hayan sido reportados.

Las causas y efectos de este tipo de accidentes son muchos y muy variados. Sólo se citan aquí dos ejemplos. En 1978, en Louisiana, Estados Unidos, un técnico radiógrafo industrial que trabajaba en una barcaza sufrió una lesión por radiación en la mano izquierda, debida a una fuente de iridio-192 de 3,7 TBq, y probablemente a causa de un funcionamiento incorrecto del detector. Alrededor de tres semanas después, su mano estaba roja e hinchada, apareciendo luego ampollas en la piel, y sanando después de 5 a 8 semanas. Sin embargo, seis meses después, el dedo índice tuvo que ser amputado parcialmente. Posteriormente, en 1990 en Shanghai, China, debido a medidas de seguridad inadecuadas, fueron expuestos siete trabajadores a la radiación de una fuente de cobalto-60 en una instalación industrial. Un trabajador, con una dosis estimada en 12 Gy, murió 25 días después de la exposición. Un segundo trabajador, cuya dosis se estimó en 11 Gy, murió 90 días después de la exposición. Los otros cinco trabajadores, que recibieron dosis estimadas en un rango de 2 a 5 Gy, se recuperaron después de tratamiento médico.

### *Fuentes huérfanas*

Entre 1966 y 2007, 31 accidentes fueron atribuidos a fuentes radiactivas perdidas, robadas o abandonadas, también conocidas como *fuentes huérfanas*. Se sabe que estos accidentes han provocado la muerte de 42 miembros del público, incluyendo niños. Además, el síndrome de radiación aguda, las lesiones locales graves, la

contaminación interna o los problemas psicológicos, exigieron la atención médica de cientos de personas. Seis accidentes fueron atribuidos a unidades abandonadas de radioterapia médica.

No se conoce el número exacto de cuántas fuentes huérfanas hay en el mundo, pero se cree que son alrededor de miles. La Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos reporta que empresas dentro de los Estados Unidos perdieron el control de cerca de 1 500 fuentes radiactivas entre 1996 y 2008, y que más de la mitad nunca se recuperó. Un estudio realizado por la Unión Europea estima que hasta 70 fuentes se pierden anualmente del control regulador dentro de sus fronteras. Aunque la mayoría de estas fuentes no plantea un riesgo radiológico significativo, los accidentes debidos a las fuentes huérfanas son la principal preocupación.

### Número mundial estimado de accidentes radiológicos graves\*

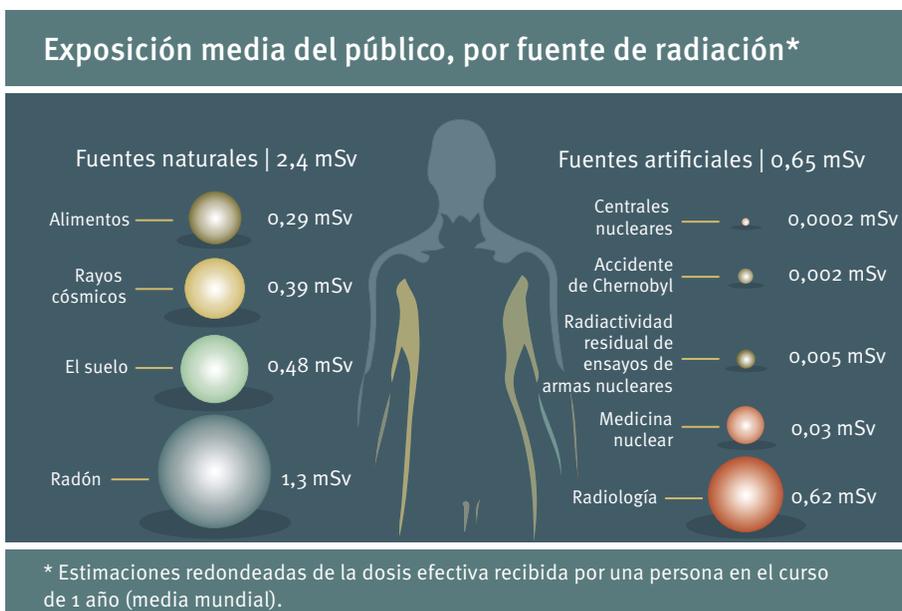
Tipo de accidente	1945–1965	1966–1986	1987–2007
En instalaciones nucleares	19	12	4
En la industria	2	50	28
Causados por fuentes huérfanas	3	15	16
En instituciones académicas y de investigación	2	16	4
En la medicina	No hay información	18	14

\* Las cifras corresponden a los accidentes que se han comunicado o dado a conocer oficialmente. Se considera que el número de los que no se han comunicado es mucho mayor, especialmente en el ámbito de la medicina.

Las fuentes selladas o sus contenedores pueden ser atractivos para las personas que buscan y recolectan desechos para el comercio de la chatarra de metal, ya que aparentan estar hechas de metal valioso, y pueden no exhibir una etiqueta de advertencia de radiación. Los casos en que los trabajadores no conscientes del peligro, o incluso los miembros del público, han manipulado fuentes han dado lugar a lesiones graves y en algunos casos a la muerte, como fue el caso en Goiânia, Brasil en 1987. Un dispositivo de teleterapia abandonado, con una fuente de cesio-137 altamente radiactiva (50,9 TBq), fue robada, y fue roto el encapsulado de la fuente. Durante las siguientes dos semanas, el polvo de cloruro de cesio soluble se dispersó a lo largo de un depósito de chatarra y las casas circundantes. Numerosas personas desarrollaron enfermedades y lesiones de la piel, y 110 000 personas tuvieron que ser examinadas para verificar si presentaban contaminación radiactiva, muchas de las cuales estaban contaminadas internamente con cesio-137. Debido a este accidente murieron cuatro personas, incluyendo a un niño.

### 3.3. Exposición media de la población y de los trabajadores

En general, la exposición del público por radiación proveniente de fuentes naturales domina la exposición total. UNSCEAR estimó la dosis efectiva anual promedio para un individuo en alrededor de 3 mSv. En promedio, la dosis anual debida a fuentes naturales de radiación es de 2,4 mSv, y dos tercios de ella provienen de sustancias radiactivas presentes en el aire que respiramos, los alimentos que comemos y el agua que bebemos. La principal fuente de exposición debida a fuentes artificiales es la radiación usada en la medicina, con una dosis efectiva media anual individual de 0,62 mSv. La exposición radiológica médica varía por región, país y por el sistema de salud local. UNSCEAR ha estimado la dosis efectiva anual promedio debida a las aplicaciones médicas de las radiaciones, en los países industrializados de 1,9 mSv y en los países no industrializados de 0,32 mSv. Sin embargo, estos valores pueden variar considerablemente (por ejemplo, en los Estados Unidos es de 3 mSv, mientras que en Kenia es de solamente de 0,05 mSv).



Hasta la década de los 90, la atención sobre la exposición de los trabajadores se centró en las fuentes artificiales de radiación. Hoy en día, sin embargo, se ha comprendido que un gran número de trabajadores están expuestos a las fuentes naturales de radiación, principalmente en la industria minera. Para ciertas ocupaciones en el sector minero, la inhalación de gas radón domina la exposición a la radiación en el trabajo. Mientras que la liberación de radón en las minas subterráneas de uranio tiene una contribución sustancial a la exposición ocupacional por parte de la industria nuclear, la dosis efectiva anual promedio de un trabajador en la industria nuclear en general ha disminuido de 4,4 mSv

en la década de los 70, a alrededor de 1 mSv en la actualidad. Sin embargo, la dosis efectiva anual promedio para un minero de carbón sigue siendo alrededor de 2,4 mSv, y para otros mineros alrededor de 3 mSv.

La estimación actual del número total de los trabajadores vigilados es de aproximadamente 23 millones en todo el mundo, de los cuales alrededor de 10 millones están expuestos a las fuentes artificiales. Tres de cada cuatro trabajadores expuestos a las fuentes artificiales trabajan en el sector médico, con una dosis efectiva anual por trabajador de 0,5 mSv. La evaluación de las tendencias de la dosis efectiva anual media por trabajador muestra un aumento en la exposición por fuentes naturales, debido principalmente a la minería, y una disminución en la exposición por fuentes artificiales, debida principalmente a adecuada implantación de medidas de protección radiológica.

<b>Tendencias mundiales de la exposición a radiación en el trabajo (en mSv)*</b>				
<b>Años</b>	<b>1970</b>	<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>
<b>Fuentes naturales</b>				
Trípulaciones de aeronaves	—	3,0	3,0	3,0
Mineros del carbón	—	0,9	0,7	2,4
Otros mineros**	—	1,0	2,7	3,0
Trabajadores de diversos sectores	—	6,0	4,8	4,8
<b>Total</b>	<b>—</b>	<b>1,7</b>	<b>1,8</b>	<b>2,9</b>
<b>Fuentes artificiales</b>				
Trabajadores en el ámbito de la medicina	0,8	0,6	0,3	0,5
Trabajadores de la industria nuclear	4,4	3,7	1,8	1,0
Trabajadores de otras industrias	1,6	1,4	0,5	0,3
Trabajadores de diversos sectores	1,1	0,6	0,2	0,1
<b>Total</b>	<b>1,7</b>	<b>1,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,5</b>
* Estimaciones de la dosis efectiva media que recibe un trabajador en 1 año.				
** Los mineros que extraen uranio se incluyen entre los trabajadores de la industria nuclear.				

## PUBLICACIONES DE UNSCEAR

Desde su creación, el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas ha presentado más de 25 informes principales con más de 100 anexos científicos, los cuales son muy estimados como fuentes principales de evaluaciones autorizadas que examinan la exposición a la radiación debida a ensayos de armas nucleares, por la producción de electricidad con energía nuclear, por el uso médico de la radiación, las fuentes de radiación ocupacional y las fuentes naturales. También evalúa los estudios detallados sobre el cáncer inducido por la radiación y las enfermedades hereditarias, y evalúa las consecuencias radiológicas de los accidentes, tanto en la salud como en el medioambiente. Los informes y anexos científicos de UNSCEAR son divulgados como publicaciones en venta de las Naciones Unidas ([unp.un.org](http://unp.un.org)), y como descargas electrónicas libres ([unscear.org](http://unscear.org)), para difundir los resultados en beneficio de los Estados Miembros de la ONU, la comunidad científica y el público.

Los comentarios y opiniones sobre esta publicación serán muy valorados en:

Secretariado de UNSCEAR  
Centro Internacional de Viena  
P.O. Box 500  
1400 Viena, Austria  
E-mail: [unscear@unscear.org](mailto:unscear@unscear.org)



En 1955, La Asamblea General de las Naciones Unidas estableció el Comité Científico sobre los efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), para recopilar y evaluar la información sobre los niveles y efectos de la radiación ionizante.

Esto se realizó en respuesta a las preocupaciones sobre los efectos de la radiación ionizante en la salud humana y el medioambiente, ya que en ese momento la caída (lluvia) de material radiactivo proveniente de los ensayos con armas nucleares en la atmósfera estaba alcanzando a la población a través del aire, agua y alimentos. El primer informe de UNSCEAR estableció las bases científicas sobre las que, en 1963, se negoció el Tratado de Prohibición Parcial de Ensayos Atmosféricos de Armas Nucleares.

Esta publicación trata de presentar de manera objetiva los conocimientos más recientes sobre los niveles de radiación y sus efectos, de una manera que sea accesible para el público en general. Está basada en los informes científicos de UNSCEAR, los cuales se utilizaron como la fuente principal de información.



PNUMA