

UN SIGLO DE PROTECCIÓN CONTRA LAS RADIACIONES IONIZANTES: CONSECUENCIAS RADIOLÓGICAS DEL ACCIDENTE DE FUKUSHIMA

Por ABEL JULIO GONZÁLEZ

Preámbulo

La *‘protección radiológica’* es la disciplina que se ocupa de la protección contra los efectos en la salud que pueden manifestarse como consecuencia de la exposición a la *‘radiación’*. La radiación es energía que se propaga en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material. La energía esta cuantizada en *cuantos* o *cuantios* (del latín quantum), es decir ‘paquetes’ de energía finita.

Si los cuantios de radiación transportan energía suficiente como para provocar ionización en el medio que la radiación atraviesa, se dice que es una *‘radiación ionizante’* (En caso contrario se habla de radiación no ionizante). A los efectos de la protección radiológica, la radiación ionizante es radiación capaz de producir pares de iones en sustancias biológicas. Esta memoria se limita a la protección contra la radiación ionizante, a la que se denominará de aquí en más simplemente como *‘radiación’*.

La eficacia biológica relativa de la radiación depende de su capacidad de transferencia lineal de energía. Cuanto mas penetrante sea la radiación tanto mas su capacidad para atravesar blindajes o el cuerpo humano.

La radiación puede ser generada por aparatos, o puede emitirse por sustancias que presentan una propiedad denominada 'radioactividad'. Estas sustancias 'radioactivas' pueden ser naturales y o producidas artificialmente,

Si los tejidos vivos son expuestos a la radiación, esta puede ionizar los átomos que los componen y producir daño. Un detrimento factible y significativo es la inducción de alteraciones denominadas 'mutaciones' en la molécula de ácido desoxirribonucleico, ADN, contenidas en las células, particularmente en el ADN que forma los cromosomas contenidos en el núcleo celular. El ADN contiene las instrucciones genéticas usadas para el desarrollo y funcionamiento de todos los organismos vivos conocidos y es responsable de su transmisión hereditaria. Por lo tanto, la mutación del ADN por la radiación al ADN es responsable de un detrimento a la salud que la protección radiológica pretende evitar o al menos limitar.

Esta memoria desarrolla una antología de los antecedentes y el presente de la protección radiológica y concluye con una descripción de las consecuencias radiológicas de una de las situaciones de exposición a la radiación más complejas: el reciente accidente en la Central Nuclear de Fukushima Daiichi en Japón.

No se han agregado referencias anotadas a la memoria. Además de utilizar datos históricos libremente disponibles y publicaciones del autor, la memoria esta basada en tres fuentes referenciales principales: (i) los informes que periódicamente somete a la consideración de la Asamblea General de las Naciones Unidas El Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica, también conocido por sus

siglas en inglés UNSCEAR¹; (ii) las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, también conocida por sus siglas en inglés ICRP, particularmente las contenidas en su publicación ICRP 103²; y (iii) la normativa internacional establecida por el Organismo Internacional de Energía Atómica, también conocido por sus siglas en castellano, OIEA, y en inglés, IAEA, particularmente las normas denominadas *protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: normas básicas internacionales de seguridad*.³ La información sobre el accidente de Fukushima Daiichi se basa en trabajos hechos por el autor con colegas internacionales y

¹ E.g., las últimas publicaciones: UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Volume I: Report to the General Assembly and Scientific Annex A. UNSCEAR 2013 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.14.IX.1. United Nations, New York, 2014.; y UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Volume I and II: Scientific Annex A and B. UNSCEAR 2013 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.14.IX.2. United Nations, New York, 2013.

² The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103; Ann. ICRP 37 (2–4), International Commission on Radiological Protection, 2007

³Radiation protection and safety of radiation sources : international basic safety standards : general safety requirements. IAEA safety standards series, ISSN 1020-525X No. GRS Part 3. STI/PUB/1531. ISBN 978-92-0-120910-8 . International Atomic Energy Agency, Vienna, 2011

japoneses⁴ así como en un informe que esta preparando un grupo de trabajo del OIEA bajo la presidencia del autor.

LOS INICIOS

“Über eine neue Art von Strahlen”

El develamiento de la radiación se produjo el 8 de Noviembre de 1895, en la Universidad de Würzburg, en Alemania, cuando Wilhelm Röntgen descubrió un fenómeno que denominó “Über eine neue Art von Strahlen” o “acerca de un nuevo tipo de rayos”. Su hallazgo fue casual: mientras trabajaba con un tubo de rayos catódicos, y tras cubrir el tubo con un cartón negro para eliminar la luz visible, observó un débil resplandor amarillo-verdoso proveniente de una pantalla con una capa de platino-cianuro de bario, que desaparecía al apagar el tubo. Especuló que los rayos catódicos estaba creando una radiación invisible. Determinó luego que esta radiación era muy penetrante, atravesando grandes espesores de papel e incluso metales poco densos. Usó placas fotográficas para demostrar que los objetos eran más o menos transparentes a esta radiación ‘incognita’ (es decir ‘X’) dependiendo de su espesor y realizó la primera radiografía humana, usando la mano de su mujer. (Figura 1)

⁴ Radiological protection issues arising during and after the Fukushima nuclear reactor accident. Abel J González, Makoto Akashi, John D Boice Jr., Masamichi Chino, Toshimitsu Homma, Nobuhito Ishigure, Michiaki Kai, Shizuyo Kusumi, Jai-Ki Lee, Hans-Georg Menzel, Ohtsura Niwa, Kazuo Sakai, Wolfgang Weiss, Shunichi Yamashita and Yoshiharu Yonekura. J. Radiol. Prot. 33 (2013) 497–571

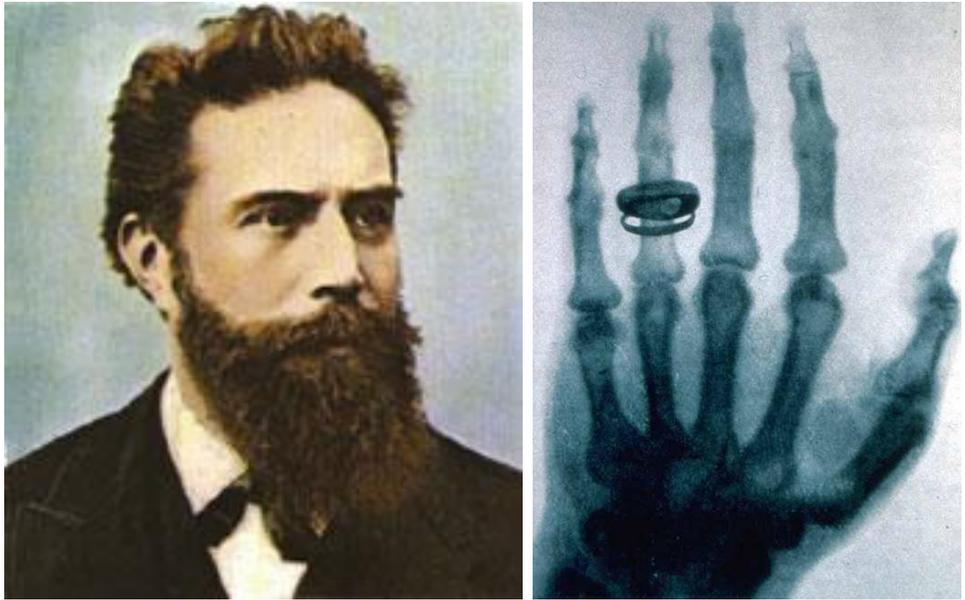


Figura 1. El descubridor de la radiación ionizante, Wilhelm Röntgen, y la radiografía de la mano de su esposa

Esta radiación que pasaría a denominarse ‘rayos Röntgen’ (aún se conserva ese nombre en Alemania) es actualmente mundialmente conocida como ‘rayos X’.

La noticia del descubrimiento de los rayos X se divulgó con mucha rapidez en el mundo. Al poco tiempo del primer informe de Röntgen se publicaron decenas de libros y más de mil artículos describiendo aplicaciones de la nueva maravilla que permitía ver lo que el ojo humano no podía penetrar. Ya el 21 de Marzo de 1896, pocos meses después de su descubrimiento, la

empresa Siemens patentó el primer tubo de rayos X. (Ver la figura 2).

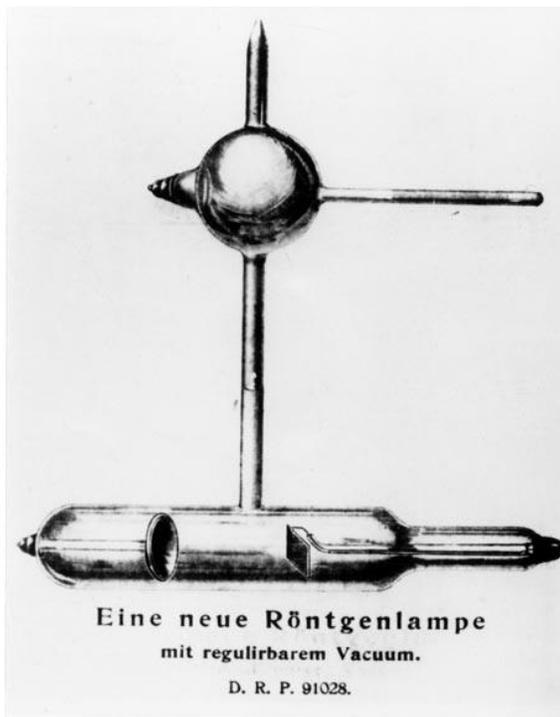


Figura 2. Primer generador de rayos X patentado por

William David Coolidge fue un físico estadounidense que gracias una beca fue a Alemania para ampliar estudios y doctorarse en la Universidad de Leipzig. Allí aprendió de los trabajos de Röntgen y en Septiembre de 1896, introdujo los “rayos mágicos” en los EE.UU (Ver Figura 3), Posteriormente, en 1913, inventó el tubo Coolidge, un tubo de rayos X con una mejora de cátodo permitían más intensa visualización.



Figura 3. Los 'rayos mágicos' del Dr. William David Coolidge

La introducción de los rayos X al mercado estadounidense inició una comercialización extraordinaria del nuevo descubrimiento. La falta de regulación sobre el nuevo descubrimiento también dio lugar a numerosos engaños (ver Figura 4)

**X-RAY
SPECS**
ONLY \$1⁰⁰

**An Hilarious
Optical Illusion**

Scientific optical principle really works. Imagine—you put on the "X-Ray" Specs and hold your hand in front of you. You seem to be able to look right through the flesh and see the bones underneath. Look at your friend. Is that really his body you "see" under his clothes? Loads of laughs and fun at parties. Send only \$1 plus 25c shipping charges. Money Back Guarantee.

HONOR HOUSE PRODUCTS CORP., Lynbrook, N.Y. Dept. 97XR02

Figura 4. Ejemplo de engaño del uso de rayos X, muy común para la época

Curiosamente una de las primeras aplicaciones de los rayos X fue en espectáculos circenses (Ver Figura 5). Es que en ese momento poder mostrar el interior del cuerpo humano era considerado casi mágico.



Figura 5. El uso de los rayos X se popularizó en circos: una 'tragasables' puede demostrar su arte

Otra curiosa aplicación de los rayos X fue en zapaterías. Desde la década de 1920, se instalaron aparatos de rayos X para probar zapatos en Estados Unidos, Canadá, Alemania y Suiza (Ver figura 6). Estas instalaciones perduraron hasta alrededor de 1970!



Figura 6. Aparato de rayos X utilizado en zapaterías para comprobar el ajuste de los zapatos

Todos estos ‘usos’ de los rayos X causaron mucho daño ¡En aquellos tiempos, la protección radiológica no existía!

La radioactividad

Mientras tanto otro descubrimiento daría más vida a la radiación. El 24 de Febrero de 1896 Henri Becquerel descubrió una nueva propiedad de la materia que posteriormente se denominó *radioactividad* o *radiactividad*. El descubrimiento se produjo durante una investigación sobre la fluorescencia. Al colocar sales de uranio sobre una placa fotográfica en una zona

oscura, comprobó que dicha placa se ennegrecía. Las sales de uranio emitían una radiación capaz de atravesar papeles negros y otras sustancias opacas a la luz ordinaria. Esta radiación, la que se comportaba de manera similar a los rayos X, tenía un origen diverso dado que era producida por ciertas sustancias 'radioactivas. Los rayos se denominaron en un principio rayos Becquerel en honor a su descubridor y hoy son conocidos simplemente como radiación.

La Figura 7 presenta la imagen de una plancha fotográfica, que fue expuesta por Becquerel a la radiación de una sal de uranio. Se ve claramente la sombra de la Cruz de Malta colocada entre la placa y la sal de uranio.

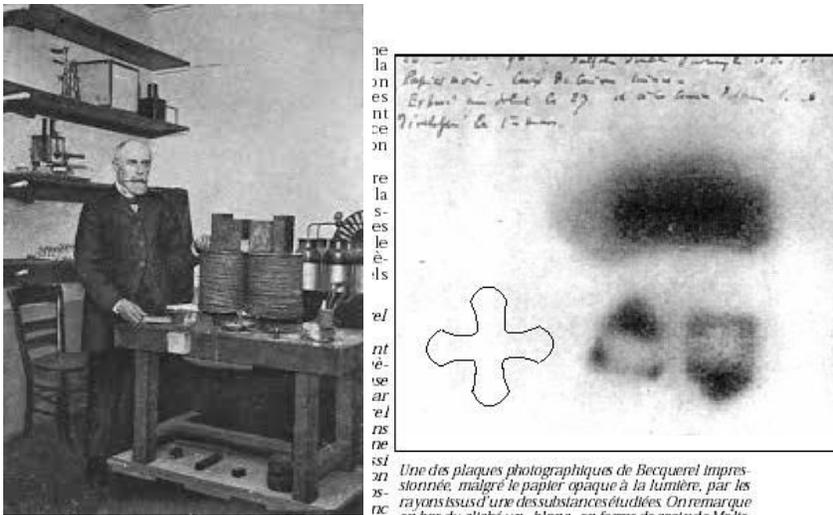


Figura 7. Henri Becquerel, revelador de la radioactividad y la prueba de su descubrimiento.

Hoy sabemos que la radiactividad es un fenómeno físico por el cual los núcleos de algunos elementos químicos, llamados radiactivos, emiten radiación. La radiactividad es una propiedad de los isótopos que son "inestables", es decir, que se mantienen en un estado excitado en sus capas electrónicas o nucleares, con lo que, para alcanzar su estado fundamental, deben perder energía. Lo hacen en emisiones electromagnéticas o en emisiones de partículas con una determinada energía cinética. Según el tipo de radiación se la califica con las letras griegas α , β y γ .

La radiación generada por las sustancias radioactivas también tuvo usos inmediatos y no necesariamente beneficiosos. En que en la primera parte del siglo XX, existía la falsa creencia general de que el radio, el elemento químico radioactivo que se conocía entonces, curaría muchas dolencias.

Falsas terapias con agua a la que se le adicionaban sustancias conteniendo radio se hicieron comunes en muchos hospitales, por ejemplo en Inglaterra (ver Figura 8)

RADIUM THERAPY

The only scientific apparatus for the preparation of radio-active water in the hospital or in the patient's own home.

This apparatus gives a high and measured dosage of radio-active drinking water for the treatment of gout, rheumatism, arthritis, neuralgia, sciatica, tabes dorsalis, catarrh of the antrum and frontal sinus, arterio-sclerosis, diabetes and glycosuria, and nephritis, as described in

Dr. Saubermann's lecture before the Roentgen Society, printed in this number of the "Archives."

DESCRIPTION.

The perforated earthenware "activator" in the glass jar contains an insoluble preparation impregnated with radium. It continuously emits radium emanation at a fixed rate, and keeps the water in the jar always charged to a fixed and measurable strength, from 5,000 to 10,000 Maché units per litre per diem.



SUPPLIED BY

RADIUM LIMITED,

93, MORTIMER STREET, LONDON, W.

Telephone: 514 HAYFAR.

Figura 8. 'Terapia' con radio en Inglaterra

En los Estados Unidos se utilizaba el 'agua con emanación de radio' para (falsamente) 'expulsar ácido úrico' y (falsamente) curar una amplia abanico de enfermedades (ver Figura 9).

**RADIUM
EMANATION WATER**
Drives Out Uric Acid

Suffering from too much uric acid and diseases caused by faulty elimination—**Rheumatism, Gout, Periodical Headaches, Neuralgia, Constipation, Neurasthenia, Auto-Intoxication and Lack of Bodily Vigor**—quickly relieved in a natural way without drugs or chemicals by our new discovery

**THE WAY TO MAKE
RADIUM WATER
IN YOUR OWN HOME**

with our Rayode. A little device containing Radium enough to supply 2,700 Mache Units of Radio-activity, in two quarts of water every twenty-four hours, for less than 10c a day. The Rayode will last a lifetime.

SEND FOR FREE LITERATURE

Tells how you can buy or rent a Rayode to make Radium Water in your own home, with your own ordinary drinking water. Address:

THE COLORADO RADIUM PRODUCTS COMPANY
635 First National Bank Building Denver, Colo

Figura 9. Utilización del radio en EEUU para ‘expulsar el ácido úrico’.

En Francia se utilizaban sustancias radioactivas adicionadas a la pasta dentífrica para (falsamente) embellecer y proteger a los dientes (ver Figura 10)

154

MÉTHODE
THO-RADIA

EMBELLISSANTE PARCE QUE CURATIVE

4^o

DENTIFRICE
THO-RADIA

A BASE DE SELS DE THORIUM

FORMULE
du Docteur Alfred CURIE

Astringent et bactéricide, il stérilise la cavité buccale, évite et combat les gingivites, prévient la carie et les pyorrhées alvéolaires. Il assainit les dents, laisse dans la bouche une délicieuse impression de fraîcheur, conserve l'éclat, la blancheur et l'intégrité de la dentition.

Le grand tube :
6 francs

**Pas de joli sourire
sans de jolies dents**

CHEZ LES PHARMACIENS EXCLUSIVEMENT



Figura 10. Uso de torio radioactivo en la pasta dentífrica en Francia

En Nueva York se anunciaban cosméticos conteniendo sustancias radioactivas para (falsamente) 'levantamiento facial sin cirugía plástica' (Ver Figura 11)

Radium Cosmetiques
 NOTHING LIKE THEM IN U. S.
 Face Lifting Without Plastic Surgery
Aimeray Radium Cosmetiques
 507 5th Ave., New York City, N. Y.



**Do You Not Know?
 The Eytome**

Invented by Dr. Francis King, well-known Ocular Muscle Specialist, is relieving all forms of Eye Troubles and doing away with glasses in great numbers of cases. Call or write 709 Grant Bldg., Los Angeles, VA. 3346.

Figura 11. Uso 'cosmético' del radio en Nueva York

Todos estos 'usos' de la radioactividad causaron mucho daño ¡En aquellos tiempos, la protección radiológica no existía!

Los radiólogos

Con el advenimiento de los rayos X y la radioactividad una nueva profesión nació, la de los radiólogos. Inicialmente fueron médicos que se ocupaban de generar imágenes del interior del cuerpo mediante rayos X y de utilizar estas imágenes para el diagnóstico y, en menor medida, para el pronóstico y el tratamiento de las enfermedades. Luego comenzaron a utilizar los rayos X en terapia, es decir

empleando directamente los rayos X (generalmente de mayor energía que los usados para diagnóstico) para el tratamiento de enfermedades generalmente tumores que se manifestaban sensibles a la radiación. Eventualmente también se haría uso de sustancias radioactivas en diversas aplicaciones médicas.

Los radiólogos carecían de los conocimientos actuales sobre la potencialidad de daño de las radiaciones y solían incurrir muy altas dosis de radiación. La práctica radiológica era muy primitiva. Estos pioneros pronto comprobarían en su propia piel cuan peligrosa era la nueva maravilla. (Ver Figura 12).

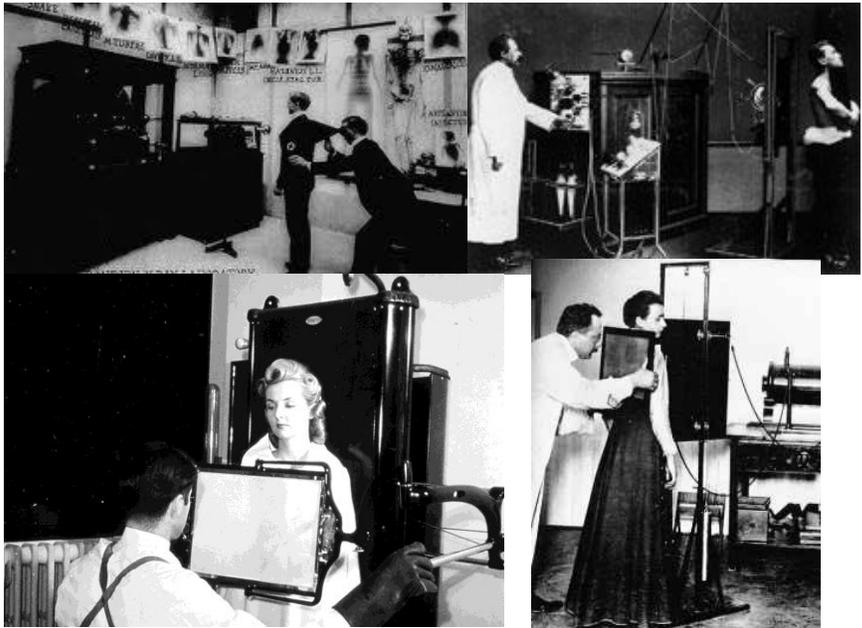


Figura 12. Algunas prácticas radiológicas comunes para la época

La ICRP

Los efectos dañinos de la exposición a los rayos X fueron aparentes en poco tiempo y los radiólogos decidieron tomar el toro por las astas. Es así que, en el 2do Congreso Internacional de Radiología que se reunió en Estocolmo en 1928, la Sociedad Internacional de Radiología estableció lo que inicialmente se denominó el Comité Internacional de Protección contra los Rayos X y el Radio (International X-ray and Radium Protection Committee) (Ver Figura 13) y que actualmente se denomina Comisión Internacional de Protección Radiológica (International Commission on Radiological Protection), ICRP. La ICRP es una asociación científica sin ánimo de lucro e independiente dedicada a fomentar el progreso de la ciencia de la protección radiológica para beneficio público, editando periódicamente documentos científicos en forma de recomendaciones o guías en todos los aspectos de la protección radiológica.

INTERNATIONAL RECOMMENDATIONS FOR X-RAY AND RADIUM PROTECTION

on the proposal of the Radio-Physics Section adopted by the Second International Congress of Radiology in Stockholm, July 27th, 1928



Figura 13. Reunión fundacional de la ICRP en Estocolmo en 1928

Las primeras recomendaciones de la ICRP ya advirtieron sobre los peligros de la sobreexposición a los rayos X y al radio e indicaban que ellos se podían evitar mediante la prestación de una protección adecuada. En ese momento, los efectos conocidos eran: Lesiones en los tejidos superficiales; y, alteraciones en los órganos internos y cambios en la sangre. Pero esas primeras recomendaciones también reflejaban la amplia ignorancia en aquellos tiempos. Por ejemplo, se recomendaba para una buena protección que: los servicios de rayos X ‘no deben ser situados por debajo del nivel de la planta baja; y que todas las

habitaciones debían estar provistas de ventanas que ofrezcan buena iluminación natural, ventilación y extracción de aire adecuada, entradas y salidas de aire para permitir la ventilación, y que ¡debían ser decoradas con colores claros!

Las 'chicas del radio'

Los profesionales que comenzaron a utilizar las propiedades de los rayos X y las sustancias radioactivas comprendieron rápidamente que su uso podía ser peligroso para la salud. Pero estas preocupaciones se mantenían en el ámbito académico y no llegaban al gran público ni a sus representantes. La situación cambió alrededor de 1920 con un escándalo laboral que ha pasado a la historia con el nombre 'las chicas del radio'

Desde 1917 a 1926, la United States Radium Corporation, de Orange, New Jersey, Estados Unidos, produjo pinturas que contenían radio radioactivo y que tenían propiedades luminiscentes gracias a las radiaciones emitidas por el radio (ver Figura 14).

The Power of Radium at Your Disposal
 Twenty-three years ago radium was unknown. Today, thanks to constant laboratory work, the power of this most unusual of elements is at your disposal. Through the medium of Undark, radium serves you safely and surely. Does Undark really contain radium? Most assuredly. It is radium, combined in exactly the proper manner with zinc sulphide, which gives Undark its ability to shine continuously in the dark.

Manufacturers have been quick to recognize the value of Undark. They apply it to the dials of watches and clocks, to electric push buttons, to the buckles of bed room slippers, to house numbers, flashlights, compasses, gasoline gauges, automobiles and many other articles which you frequently wish to see in the dark.

The next time you fumble for a lighting switch, bark your shine on furniture, wonder vainly what time it is *before* of the dark—remember Undark. *It shines in the dark.* Dealers can supply you with Undark articles.

For interesting little folder telling of the production of radium and the uses of Undark address

RADIUM LUMINOUS MATERIAL CORPORATION
 20 FIFTH AVENUE NEW YORK CITY

UNDARK
Radium Luminous Material
Shines in the Dark

To Manufacturers
 The number of manufactured articles to which Undark will add increased usefulness is manifold. From radio transmitters, to low energy ultraviolet spectrographs. Wholesale concern inquiries from manufacturers only, when it seems advisable, will carry on experimental work for them. Undark may be applied either at room glass, or at room level. The application of Undark is simple. It is furnished as a powder, which is mixed with an adhesive. The paste thus formed is painted on with a brush. It adheres tenaciously to any surface.

Figura 14. Pintura luminiscente con radio

La Radium Corporation empleó a más de un centenar de muchachas jóvenes, chicas, para pintar números radio-iluminados en relojes y en instrumentos militares (ver Figura 15). Las chicas se hicieron famosas porque murieron de manera horrible debido a la incorporación de radio en sus huesos. Se les había dicho que la pintura era inofensiva. Ingirieron cantidades mortales de radio lamiendo sus pinceles para afinarlos; también se pintaban las uñas y los dientes. Las consecuencias fueron dramáticas: se le empezaron a caer los dientes sin motivo aparente, aparecieron terribles dolores de en su mandíbula, la

mayoría desarrollaron tumores óseos cancerosos, fragilidad de huesos y amputaciones y muchas murieron por estas causas.



Figura 15. Las ‘chicas del radio’

Las “Chicas del radio” iniciaron una causa legal que recorrió todo el sistema judicial estadounidense llegando hasta la Corte Suprema. Este caso produjo uno de los primeros cambios legislativos ligados a la protección radiológica afectando de varias formas la ley de derecho laboral en Estados Unidos y llevando a instaurar compensaciones para trabajadores y la creación de procedimientos de seguridad reglamentarios en radiología

¿Qué sucedía en la Argentina?

La Argentina fue pionera en el uso profesional de las radiaciones. Ya en 1922 (seis años antes a que se estableciera la ICRP) a iniciativa un joven médico , el Dr. Ángel H. Roffo, la Academia Nacional de Medicina creó el Instituto de Medicina Experimental para el Estudio y Tratamiento del Cáncer (Ver Figura 16), el que actualmente se denomina Instituto de Oncología Ángel Roffo. Este instituto fue el primer establecimiento radio-oncológico de América. Al presente ocupa un predio de casi 4 hectáreas, con amplios espacios verdes y 13 pabellones; atiende 63870 consultas anuales; el Área Quirúrgica opera entre 180 y 200 pacientes mensuales, en 6 quirófanos. Dispone de un área de investigación formada por 4 Departamentos (Biología Celular, Inmunobiología, Carcinogénesis Química y Ambiental, Bioterio y Cáncer Experimental) y una unidad de transferencia génica.



Figura 16. El Instituto de Medicina Experimental para el Estudio y Tratamiento del Cáncer en 1922

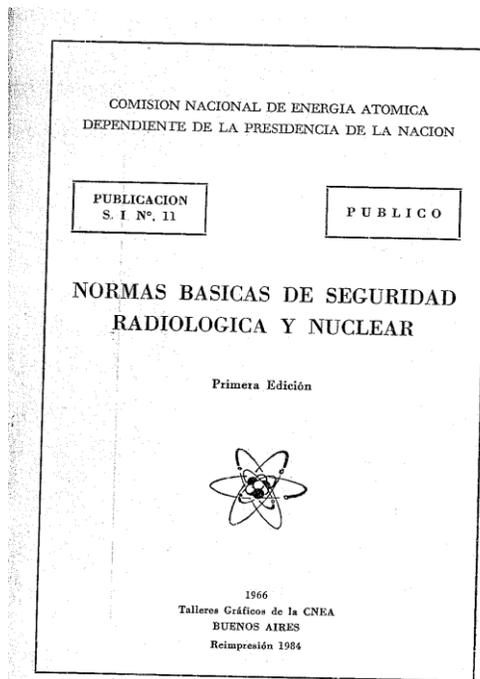
Pocos años después, en 1931, el Hospital Municipal de Oncología Marie Curie (HMOMC), en el Parque Centenario de Buenos Aires, inicia el uso del radio en oncología (Ver Figura 17). Actualmente el HMOMC es un hospital oncológico que cuenta con otros equipos incluyendo aparatos de Rayos X, que atiende fundamentalmente patologías de origen oncológico realizando aproximadamente 2000 estudios de radiología por mes.



Figura 17. El Hospital Municipal de Oncología Marie Curie en 1931

La Argentina también fue pionera en la regulación de las radiaciones. En 1950 se creó la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y el Artículo 3 del Decreto 10936 de creación ya estableció que ‘serán funciones específicas de la CNEA...controlar las investigaciones atomísticas oficiales y privadas que se efectúen en todo el territorio de la Nación’. Este instrumento legal genera el comienzo de la regulación de la protección radiológica en Argentina, una de las primeras en el mundo, la que se desarrolla en los años 1956 -58.

El Decreto Ley N° 22.498/1956 (ratificado por la Ley N° 14.467/1958) en su artículo 2 estableció como uno de los objetos de la CNEA) “fiscalizar las aplicaciones científicas e industriales de las transmutaciones y reacciones nucleares, en cuanto sea necesario por razones de utilidad pública o para prevenir los perjuicios que pudieren causar”. Este Decreto fue reglamentado por el Decreto N° 842 del 24 de enero de 1958 que es el primer instrumento regulatorio formal de Argentina. Así, en 1966, la Argentina promulga sus normas básicas de seguridad radiológica y nuclear, una de las primeras normas nacionales del mundo (ver Figura 18). (La Junta de Gobernadores del OIEA había aprobado las primeras normas básicas internacionales en junio de 1962, las que fueron publicadas el como Vol. N° 9 de la Colección Seguridad del OIEA.9



24

Figura 18. Las primeras normas ed protección radiológica Argentinas

EL PRESENTE

La protección radiológica se ha desarrollado de una manera que era impensable hace pocos años, tanto internacionalmente como en Argentina.

La situación nacional

En la Argentina se creó la actual autoridad regulatoria mediante la Ley N° 24.804/1997, Ley Nacional de la Actividad Nuclear, la que en su Artículo 7° estableció que 'la Autoridad

Regulatoria Nuclear tendrá a su cargo la función de regulación y fiscalización de la actividad nuclear en todo lo referente a los temas de seguridad radiológica y nuclear, protección física y fiscalización del uso de materiales nucleares, licenciamiento y fiscalización de instalaciones nucleares y salvaguardias internacionales, así como también asesorar al Poder Ejecutivo en las materias de su competencia.’

La Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) es la institución del Estado Argentino dedicada al control y fiscalización de la actividad nuclear. Es una entidad autárquica en jurisdicción de la Secretaría General de la Presidencia de la Nación, cuya misión es proteger a las personas, el ambiente y las futuras generaciones del efecto nocivo de las radiaciones ionizantes y cuyo objetivo principal es establecer, desarrollar y aplicar un régimen regulatorio para todas las actividades nucleares que se realicen en la Argentina. La ARN es una de las pocas autoridades regulatorias que dispone de laboratorios propios (ver Figura 19) que le dan independencia en la verificación del cumplimiento de la normativa de protección vigente.

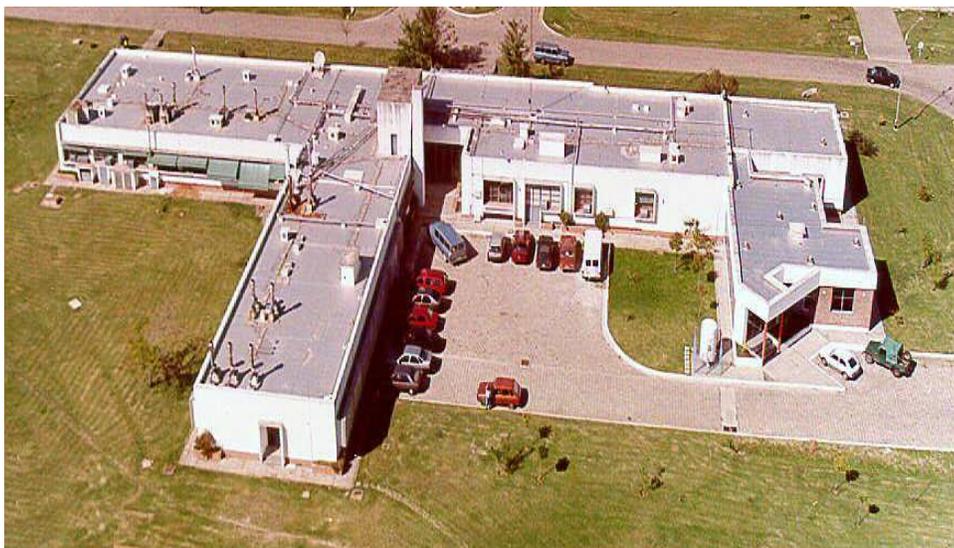


Figura 19. Laboratorios de la ARN en Ezeiza, Provincia de Buenos Aires

La ARN controla actividades que hacen uso de las radiaciones en todo el territorio Argentino (ver Figura 20)

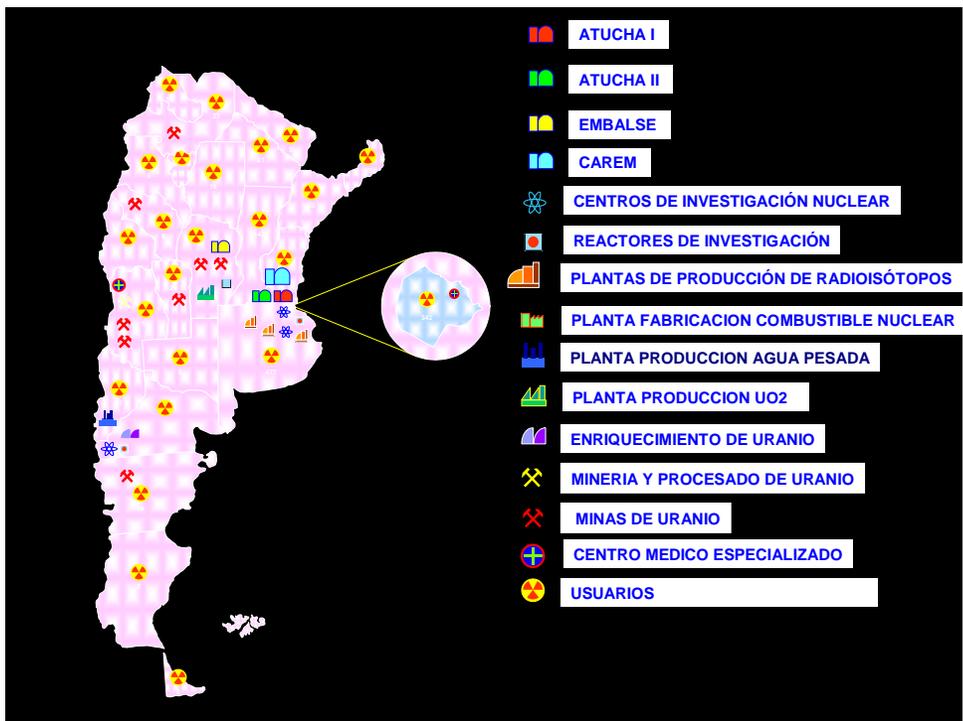


Figura 20. Control de la protección radiológica en Argentina

La ARN es también un centro de formación disciplinaria. Desde hace más de treinta años lleva a cabo conjuntamente con la Universidad de Buenos Aires y el Ministerio de Salud Pública un curso de post-grado en la especialidad en el que se ha graduado cerca de mil especialistas no solo de Argentina sino de todo el mundo (Ver Figura 21).

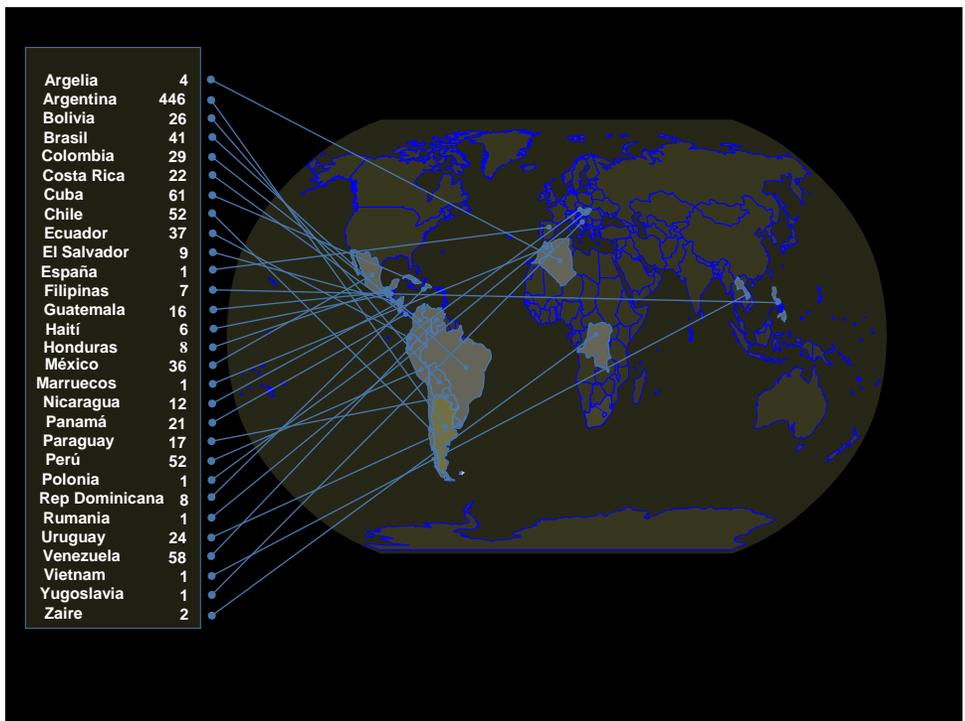


Figura 21. Alumnos que han hecho el curso de postgrado en protección radiológica

La situación internacional

El desarrollo internacional también ha sido notable. La protección radiológica contemporánea se basa en las siguientes fundaciones internacionales:

- UNSCEAR tiene la misión de estimar niveles y efectos de exposición a radiación ionizante. Los informes del Comité se usan como base epistemológica para evaluar los riesgos de la radiación con el objeto de para establecer modelos de protección. UNSCEAR fue creado por la Asamblea General de Naciones

Unidas en 1955. La Asamblea General designó 21 países para que proporcionaran científicos como miembros del Comité. Desde 1958, el UNSCEAR ha informado regularmente sus estimaciones a la Asamblea General. La Argentina forma parte del reducido número de países que integran el UNSCEAR. El UNSCEAR, en resumen, es el encargado de la epistemología de la radiación, es decir de las estimaciones sobre método, validez y alcance del conocimiento científico sobre la radiación.

- La ICRP recomienda el paradigma aplicable a la protección contra las radiaciones, es decir la ICRP es responsable de desarrollar modelo conceptual para mantener protegidos a los seres humanos y su hábitat. La ICRP es una asociación científica sin ánimo de lucro e independiente dedicada a fomentar el progreso de la ciencia de la protección radiológica para beneficio público. Para ello edita periódicamente documentos científicos en forma de recomendaciones o guías que cubren todos los aspectos de la protección radiológica. Fue fundada en 1928 por la Sociedad Internacional de Radiología, llamándose en un primer momento Comité Internacional de Protección ante los Rayos-X y el Radio, y cambiando su nombre en 1950 al actual.

- Teniendo en cuenta las estimaciones del UNSCEAR y las recomendaciones de la ICRP. el OIEA establece las normas o estándares internacionales sobre protección radiológica y seguridad nuclear, en co-patrocinio con otras organizaciones intergubernamentales en las Naciones Unidas (ONU). El OIEA está autorizado por su Estatuto a ejercer las funciones de (i) establecer o adoptar, en consulta, y cuando proceda, en colaboración con los órganos competentes de las Naciones Unidas y con los organismos especializados interesados, normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el

peligro para la vida y la propiedad, y (ii) a proveer a la aplicación de estas normas a petición de un Estado, a cualquiera de las actividades de ese Estado en el campo de la energía atómica. El OIEA debe utilizar estas normas en sus propias operaciones, y cualquier Estado las puede aplicar mediante sus disposiciones de reglamentación de la seguridad nuclear y radiológica. El amplio conjunto de normas de seguridad del OIEA, las que son revisadas periódicamente, junto a las provisiones del OIEA para facilitar su aplicación, se han convertido en el elemento clave de un régimen de seguridad nuclear de alcance mundial.

La Figura 22 describe sucintamente el funcionamiento del sistema internacional. Los logros y las tendencias internacionales de protección radiológica fueron discutidas en el 12 ° Congreso de la Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA), *Fortalecimiento de la protección contra las radiaciones en todo el mundo –Perspectivas globales y tendencias futuras*, el que tuvo lugar en Buenos Aires. IRPA es la asociación que agrupa a todos los profesionales de la protección radiológica. El propósito principal de IRPA es proporcionar un medio por el que los que participan en las actividades de protección radiológica en todos los países puedan comunicarse más fácilmente entre sí y, a través de este proceso, la protección radiológica avance en muchas partes del mundo. Esto incluye aspectos relevantes de estas ramas del conocimiento como la ciencia, la medicina, la ingeniería, la tecnología y la ley, para asegurar la protección del hombre y su medio ambiente contra los peligros causados por la radiación, y por lo tanto para facilitar el uso seguro de médicos, científicos, y prácticas radiológicas industriales para beneficio de la humanidad.



Figura 22. Descripción somera del sistema internacional de protección radiológica

LA EPISTEMOLOGÍA

Cuantificación

Una característica única de la protección radiológica y la seguridad nuclear es la plena armonización internacional de las magnitudes y unidades que se utilizan en la cuantificación de la radiación. Esto se ha logrado bajo la influencia de la Comisión Internacional de Radiación Medidas y Unidades (ICRU), una

organización hermana de la ICRP y es una característica notable de la radiación vis-à-vis otros contaminantes. Las magnitudes fundamentales son la *actividad* de la radioactividad y la *dosis* de radiación.

Radiactividad

La magnitud que cuantifica a la radioactividad se denomina *actividad*, A. Correspondiente a una cantidad de un radionucleido en un estado determinado de energía, en un tiempo dado, y está definida por la expresión definida por la expresión:

$$A(t) = dN/dt$$

siendo dN el valor esperado del número de transformaciones nucleares espontáneas a partir de ese estado determinado de energía, en el intervalo de tiempo dt.

El nombre especial para la unidad de actividad en el sistema internacional (SI) es *bequerelio o bequerel* y es igual la reciproca del segundo. Por lo tanto, la unidad de actividad en el sistema internacional (SI) es, s⁻¹, a la que se le ha dado ese nombre especial de bequerel (Bq). Debe notarse que en el pasado la unidad denominada curie fue (y sigue siendo) ampliamente utilizada (1 curie = 3.7 10¹⁰ bequerel).

La actividad ha llevado a la confusa noción de *contaminación* (con sustancias radioactivas). Se define formalmente el término contaminación como la presencia de sustancias radiactivas sobre superficies, o dentro de sólidos, líquidos o gases (incluido el cuerpo humano), donde tal presencia no es ni intencionada ni deseable, o como proceso que provoca la presencia de sustancias radiactivas en dichos

lugares. La definición no incluye el material radiactivo residual que queda en un emplazamiento que ha utilizado sustancias radioactivas una vez clausurado. El término contaminación puede tener una connotación no intencionada. Este término se refiere solo a la presencia de radiactividad y no indica la magnitud del peligro que ésta conlleva. Sin embargo, mientras que los expertos lo entienden como simple presencia el público en general lo entiende como peligro.

Radiación

Tanto los generadores específicos de radiación (como los aparatos de rayos X) como las sustancias que presentan actividad emiten radiación, la que puede exponer a las personas. La radiación puede ser recibida desde el exterior del cuerpo (exposición externa) o por sustancias radiactivas que ingresan al cuerpo por inhalación, ingestión, por incorporación percutánea o a través de heridas abiertas (exposición interna). Las consecuencias potenciales para la salud de las personas expuestas a la radiación dependen de la cantidad de radiación recibida, y también de los tipos de radiación involucradas y los órganos expuestos.

La cantidad de radiación se mide en términos de la magnitud denominada dosis de radiación. La dosis de radiación absorbida por la materia, incluida la materia constitutiva de los tejidos humanos, se denomina dosis absorbida, D. La dosis absorbida es la magnitud física fundamental para cuantificar la radiación, y esta definida por la ecuación:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

donde:

$d\epsilon$ es la energía media impartida por la radiación ionizante a la masa dm .

La unidad SI de la dosis absorbida es el $J\ kg^{-1}$, a la que se le asignado el nombre especial *gray* (Gy cuyo submúltiplo milésimo es el miligray.). En el pasado fue utilizado el *rad*: $1\ rad = 0.01\ Gy$.

Los diferentes tipos de radiación tienen una eficacia diferente para inducir daño. Por lo tanto, para cuantificar el daño producido por un campo radiante constituido por varios tipos de radiación, la dosis absorbida debe ser ponderada por *factores de ponderación de la radiación*, w_R , de manera de poder tener en cuenta la diferente eficacia de diversos tipos de radiación. La magnitud ponderada resultante se denomina *dosis equivalente*, H_T , en un órgano o tejido, T , y viene dada por la ecuación:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

donde:

$D_{T,R}$ es la dosis absorbida media debida al tipo de radiación R en el órgano o tejido T , y

w_R es el factor de ponderación de radiación, el que es un factor sin dimensiones por el que se multiplica la dosis absorbida en órganos o tejidos para reflejar la mayor eficiencia biológica de las radiaciones de alta transferencia lineal de energía (LET) comparadas con

las de baja LET. Se emplea para deducir la dosis equivalente a partir de la dosis absorbida promediada en un órgano o tejido. Como w_R no tiene dimensiones, la unidad de la dosis equivalente es la misma que para la dosis absorbida, $J\ kg^{-1}$, pero para evitar confusiones, se le ha dado un nombre especial diferente: se la denomina sievert (Sv).

La tabla siguiente presenta los factores de ponderación de radiación, w_R . Los valores dan una idea general de la radioeficacia de los diversos tipos de radiación.

Factores de ponderación de la radiación w_R

Tipo de radiación	Factor de ponderación de la radiación w_R
Fotones	1
Electrones ^a y muones	1
Protones y piones cargados	2
Partículas alfa ,Fragmentos de fisión, lones pesados	20
Neutrones	Una función continua de la energía del neutrón (ver Figura 1 y Ecuación. 4,3)

Todos los valores están relacionados a la radiación incidente en el cuerpo o, para las fuentes de radiación internas, emitidas por radionucleido(s) incorporado(s).

Por otra parte, los diferentes órganos y tejidos tienen sensibilidades diferentes a la exposición a la radiación. Por lo tanto, para cuantificar el riesgo total para la salud, la dosis equivalente tiene que ser ponderada con *factores de ponderación de los tejidos*, w_T , para tener en cuenta las diferentes sensibilidades a la radiación de varios órganos y tejidos. La magnitud resultante de la ponderación de la dosis equivalente se denomina *dosis efectiva*. En resumen la dosis efectiva, E , es la suma de las dosis equivalentes en todos los

tejidos y órganos especificados del cuerpo ponderada por la radio-sensibilidad de los tejidos. E esta dada por la expresión:

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad \text{o} \quad E = \sum_T w_T H_T$$

donde:

H_T es la dosis equivalente en el órgano o tejido T, la que es igual a $w_R D_{T,R}$, y

w_T es el factor de ponderación de tejido, definido como el factor por el que se pondera la dosis equivalente en un órgano o tejido T para representar la contribución relativa de ese órgano o tejido al detrimento total en la salud que resulta de una exposición total del cuerpo; la ponderación se efectúa de forma que:

$$\sum_T w_T = 1$$

La unidad para la dosis efectiva es la misma que para la dosis absorbida, $J\text{ kg}^{-1}$, y su nombre especial también es *sievert*, (Sv).

La tabla siguiente presenta los factores de ponderación de los tejidos, w_T , los que dan una idea general de la radio-sensibilidad de los diversos tejidos.

Factores de ponderación de los tejidos w_T

Tejido	w_T	Σw_T
Medula ósea, colon, pulmón, estómago, mama, resto de los tejidos *	0,12	0,72
Gónadas	0,08	0,08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides	0,04	0,16
Superficie del hueso, cerebro, glándulas salivales, piel	0,01	0,04
	Total	1,00

* Resto de los Tejidos: Adrenales, región extra torácica (ET), vesícula, corazón, riñones, nódulos linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo, útero/cérvix

Como se ha indicado, ambas magnitudes fundamentales para la seguridad, la dosis equivalente y la dosis efectiva, se miden en la misma unidad denominada sievert (Sv) y en su submúltiplo el milisievert, que equivale a una milésima parte de un *sievert* (en el pasado, la unidad utilizada fue el rem; 1 rem = 0.01 Sv). Esta práctica de utilizar una misma unidad para dos magnitudes diferentes ha sido causa de gran confusión en los medios de información pública, dado que generalmente informan la cantidad y la unidad si hacer referencia a la magnitud.

En resumen, la dosis equivalente se utiliza para expresar dosis de tejidos y órganos, y la dosis efectiva se utiliza para evaluar las implicaciones en todo el cuerpo. Estas dos magnitudes sólo pueden ser formalmente utilizados para situaciones normales, es decir, para situaciones que causan dosis relativamente bajas, y en principio no se pueden utilizar adecuadamente para expresar las altas dosis que se pueda incurrir por ejemplo en un accidente. En estos casos la dosis absorbida en gray o miligray debe ser utilizada.

Las normas de protección radiológica contienen coeficientes nominales universalmente acordados para la conversión de dosis absorbida en dosis equivalente y dosis efectiva.

La figura 23 ilustra la interrelación entre las magnitudes utilizadas en protección radiológica

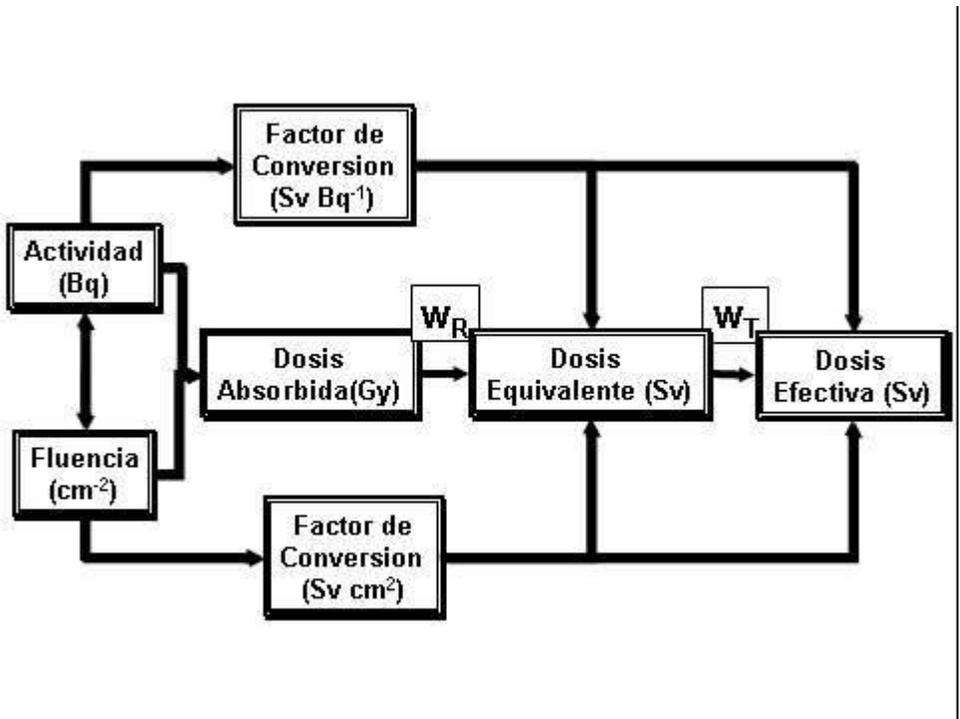


Figura 23. Interrelación entre las magnitudes utilizadas en protección radiológica

La dosis equivalente y la dosis efectiva no pueden ser medidas directamente. Por consiguiente el sistema de protección incluye magnitudes operacionales que pueden medirse, y a partir de las cuales se pueden evaluar la dosis

equivalente y la dosis efectiva. Los instrumentos para la evaluación de las dosis en personas o en el ambiente suelen ser calibrados contra magnitudes físicas operacionales que son rigurosamente definidas por ICRU e incorporadas en las normas internacionales. Estas magnitudes operacionales son el *equivalente de dosis personal* y el *equivalente de dosis ambiental*, las que se expresan también en sieverts y, numéricamente, corresponden aproximadamente a las magnitudes de protección radiológica. Las magnitudes operacionales son formalmente utilizadas para la verificación del cumplimiento de la normativa de seguridad.

Por razones de simplificación, en esta memoria se empleará fundamentalmente la dosis efectiva y sobre todo la unidad milisievert (mSv).

Niveles Globales de Radiación

Para dar cierta perspectiva a la exposición a las radiaciones es conveniente presentar un breve resumen de los niveles globales de radiación ionizante a los que están expuestos tanto los miembros del público como los trabajadores. Los mayores niveles de exposición pública son ocasionados por la radiación de fondo natural y la de fuentes artificiales de uso médico, tales como las que se utilizan en procedimientos de diagnóstico médico y terapéutico, y la ocasionada por los ensayos de armas nucleares. Además existen muchas ocupaciones que aumentan la exposición a la radiación de los trabajadores, sea esta artificial o natural. Todas estas fuentes son periódicamente estimadas por el UNSCEAR

La radiación natural

Desde el comienzo mismo de su existencia en el planeta, los seres humanos han estado expuestos a la radiación ionizante proveniente de fuentes *naturales*, la que a lo largo de la evolución de la humanidad fue modificada por la actividad humana. Además, durante los últimos cien años aproximadamente han surgido nuevas fuentes de radiación creadas por el hombre, generalmente denominadas *artificiales*.

Las principales fuentes naturales de exposición a la radiación son los rayos cósmicos y los radionúclidos naturales presentes en la tierra. La radiación cósmica es notablemente superior en las altitudes de crucero de los aviones que en la superficie de la Tierra (ver Figura 24).

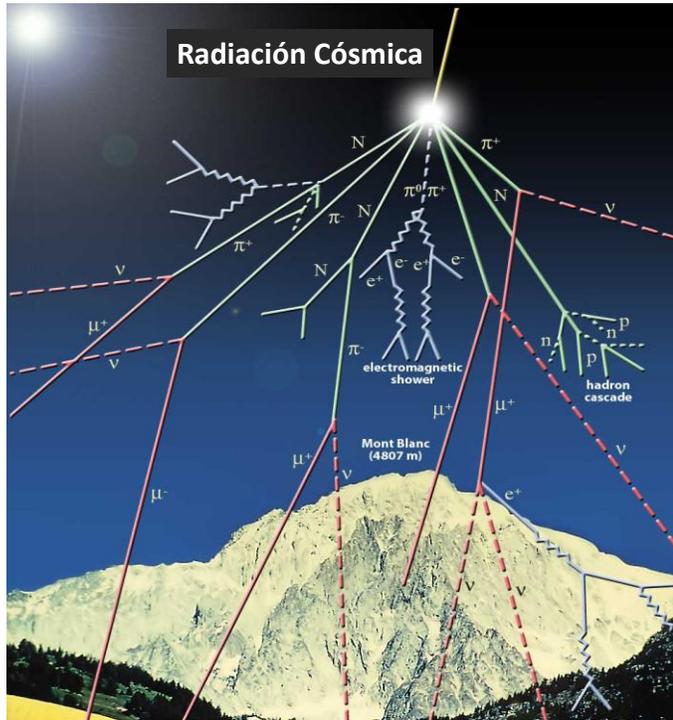


Figura 24. Cascada de radiación producida por la radiación cósmica

Las tasas de exposición externa debida a los radionúclidos naturales en la corteza terrestre varían considerablemente de un lugar a otro y pueden llegar a exceder 100 veces la media (Ver ejemplo en la Figura 25).

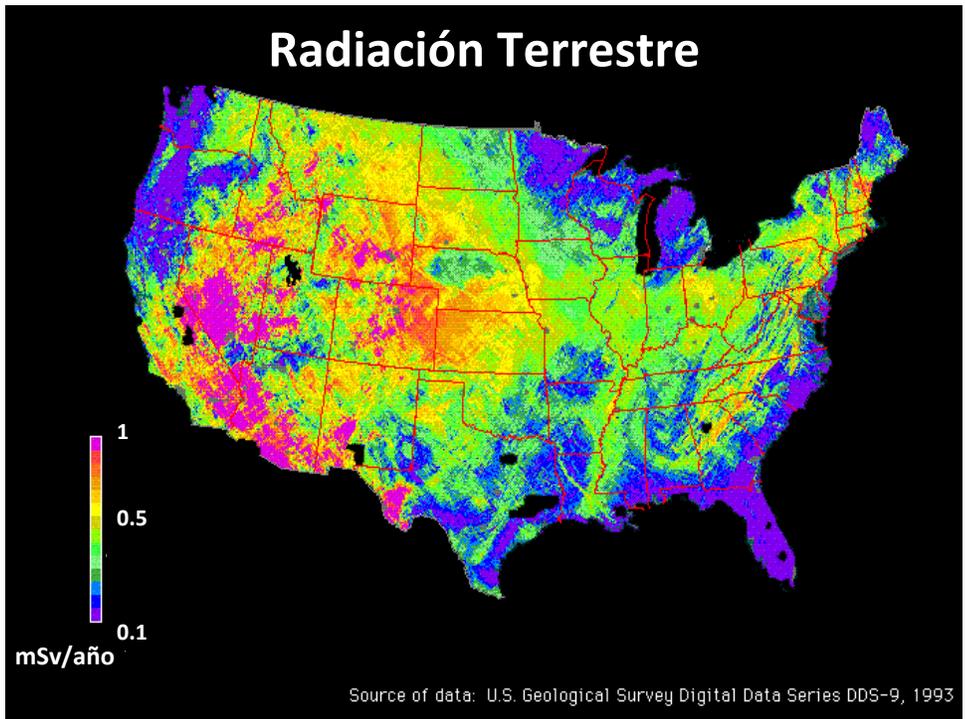


Figura 25. Tasas de exposición externa debida a los radionúclidos naturales en la corteza terrestre en EEUU

Un radionucleido natural importante es el radón, un gas que se forma durante la desintegración del uranio natural presente en la tierra desde donde penetra en los hogares y otros lugares habitables y expone a la población (Ver Figura 26). La exposición debida a la inhalación del radón por las personas que viven y trabajan en interiores varía drásticamente en dependencia de la geología local, las características constructivas de los edificios y los estilos de vida doméstica. La exposición al radón representa aproximadamente el 50% de la

exposición media a la radiación incurrida por los seres humanos.

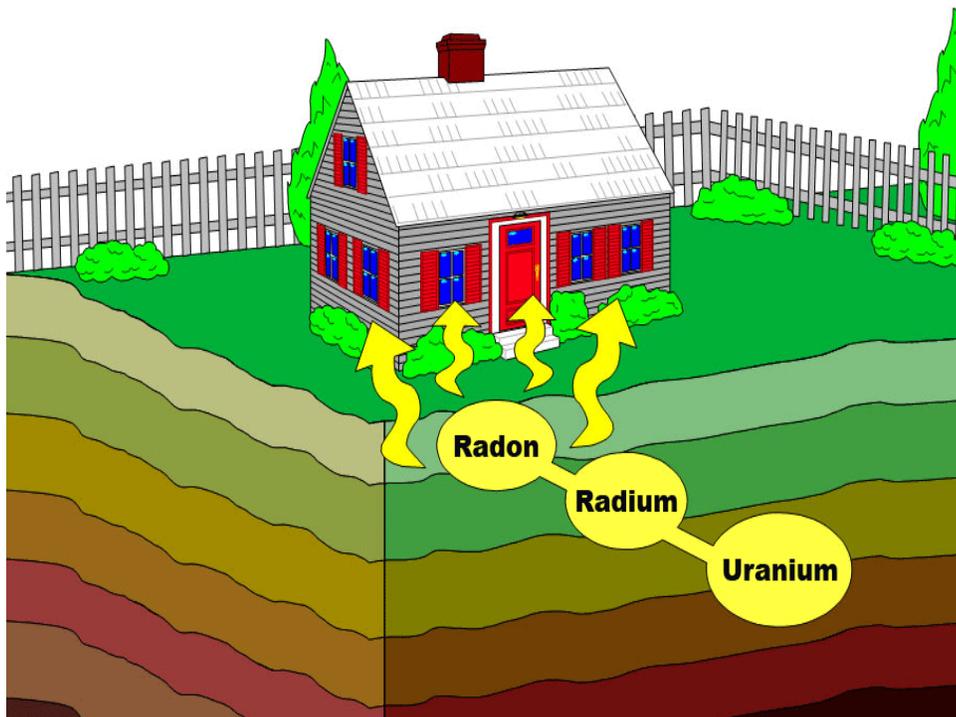


Figura 26. Caminos de generación de la exposición al radón

Como se puede apreciar, la exposición a la radiación natural es importante y muy variable. La Figura 27 presenta la variación para Europa occidental y la Figura 28 presenta lugares del mundo con tasa de dosis particularmente elevadas.

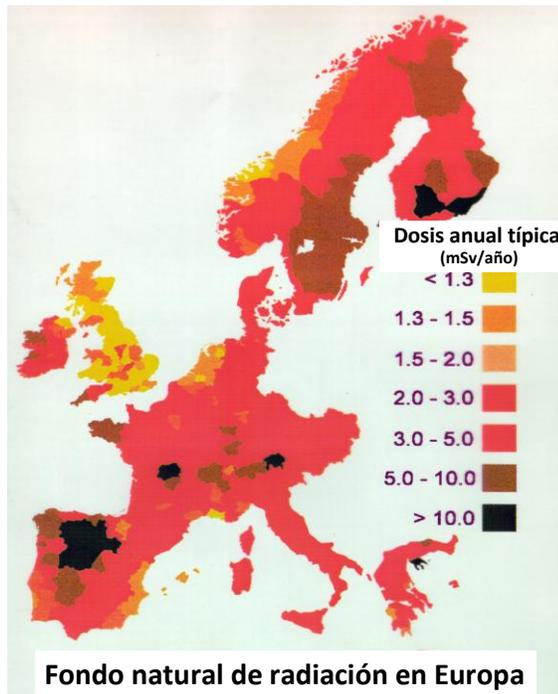


Figura 27. Tasa de dosis de radiación natural en Europa occidental

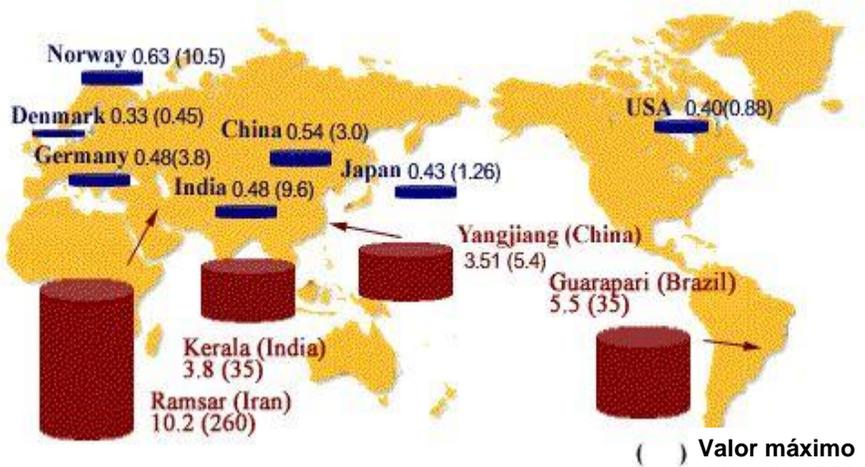


Figura 28. Algunos sitios con tasas de radiación natural particularmente elevadas.

La figura 29 presenta un resumen estilizado de la incidencia de la radiación natural en el mundo.

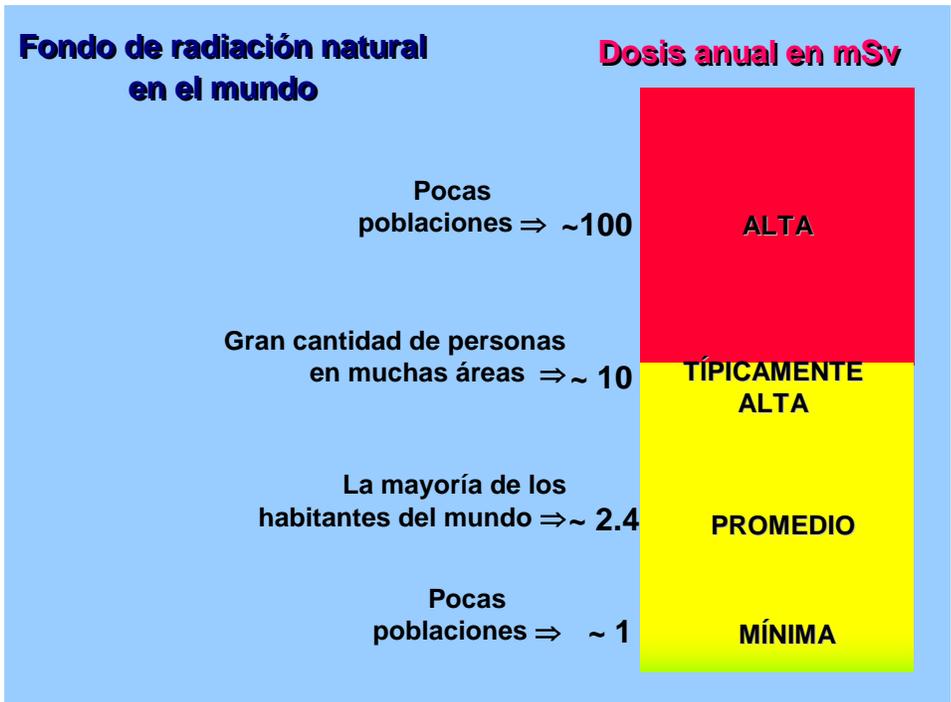


Figura 29. La radiación natural en el mundo

La Radiación Artificial

Una fuente artificial significativa de exposición a las radiaciones son las generadas por actividades nucleares con fines militares. En varios polígonos, casi todos situados en el hemisferio septentrional, se han realizado ensayos de explosivos nucleares, tanto en la atmósfera como subterráneos (ver Figura 30). La mayoría de estos ensayos se concentró en el período 1952-1958 y los años 1961 y 1962.

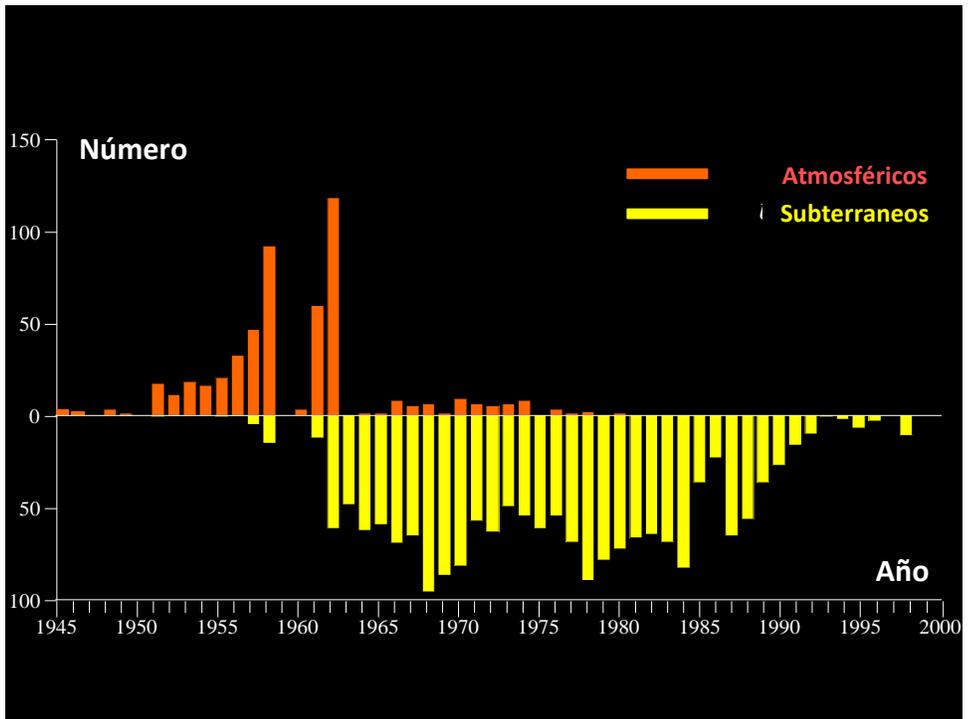


Figura 30. Ensayos de armas nucleares

La precipitación radiactiva debida a esos ensayos representa una fuente de exposición continua a las radiaciones, incluso en la actualidad aunque a niveles muy bajos (ver Figura 31). Sin embargo, existe preocupación respecto del regreso de residentes de las zonas de esos polígonos, los que fueron evacuados antes de los ensayos nucleares, ya que en algunos lugares los niveles de radioactividad residual son aun considerables. Las personas que viven próximas a lugares en que se produjeron materiales y armas nucleares están también expuestas a niveles aumentados de radiaciones. Asimismo, la utilización del uranio empobrecido con fines militares,

especialmente en la fabricación de municiones perforantes de blindaje, ha suscitado preocupaciones respecto de la contaminación residual, aunque en términos generales los niveles de exposición se han mostrado insignificantes.

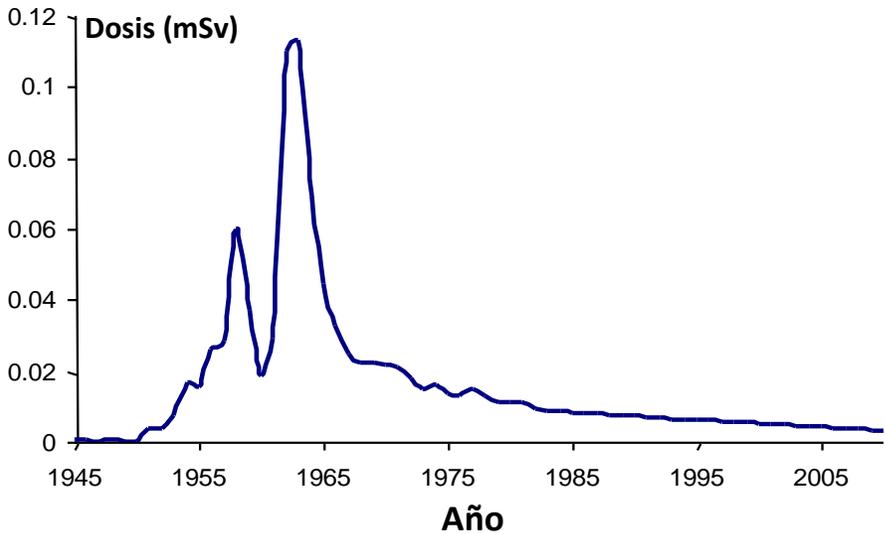


Figura 31. Exposición mundial debido a los ensayos de armas nucleares

En cuanto a la utilización de las radiaciones con fines pacíficos, la exposición médica es con mucho la forma predominante y la que causa las mayores dosis en la población. Ese tipo de exposición es casi siempre voluntaria y reporta un beneficio directo a la persona expuesta. Independientemente del

nivel de atención médica de un país, la utilización de las radiaciones con fines médicos sigue aumentando a medida que las técnicas se perfeccionan y generalizan. Cada año se realizan en todo el mundo varios miles de millones de exámenes radiológicos. Si bien en el mundo, la exposición médica representa un 25% de la exposición media a la radiación natural, en países con niveles altos de atención médica representa alrededor del 80% de la exposición a fuentes de radiación natural.

Finalmente se encuentran las fuentes de exposición pública debidas a la energía nuclear. Pese a que la producción de energía eléctrica en centrales nucleares ha aumentado de manera constante desde 1956, la exposición pública global promedio derivada de las instalaciones nucleares se ha mostrado insignificante frente a las debidas a la radiación natural y a las fuentes médicas. El ciclo del combustible nuclear que causa exposición a las radiaciones comprende la extracción y tratamiento del uranio, la fabricación del combustible, la producción de energía en los reactores nucleares, el almacenamiento o reelaboración del combustible irradiado y el almacenamiento y eliminación de desechos radiactivos. Las dosis de radiación a que está expuesta la población varían mucho de un tipo de instalación a otra, pero suelen ser bajas y disminuyen notablemente a medida que aumenta la distancia a que se encuentra la instalación. Las dosis recibidas por las poblaciones locales y regionales a partir de los reactores nucleares disminuyen con el tiempo gracias a la reducción de los niveles de descarga.

Todas estas fuentes de radiación exponen no solo al público sino fundamentalmente a los trabajadores involucrados. En el ámbito de la exposición ocupacional, la atención se había

centrado tradicionalmente en las fuentes de radiación artificiales; sin embargo, en la actualidad se reconoce que un número muy grande de trabajadores están expuestos a fuentes de radiación naturales en ocupaciones tan diversas como la minería, cuyos mineros están expuestos a altas dosis de radiación terrestre, y las tripulaciones de aviones comerciales que están expuestas a elevados niveles de radiación cósmica. La exposición ocupacional a las radiaciones en centrales nucleares comerciales es baja en comparación y ha venido disminuyendo de manera constante durante los últimos 30 años, aunque con notables diferencias entre los tipos de reactor. Las estimaciones de la exposición de los trabajadores del ciclo del combustible nuclear son por lo general más completas y exhaustivas que las que se refieren a otros usos de las radiaciones. En cambio, la vigilancia y notificación de la exposición profesional en los sectores de la medicina y la industria son menos integrales. Si bien la dosis media de exposición de los trabajadores de todos los grupos ocupacionales ha disminuido notablemente durante los últimos dos decenios, la exposición ocupacional a fuentes de radiación naturales apenas ha sufrido cambios.

La fuerza de trabajo expuesta a la radiación en las centrales nucleares, de varios cientos de miles de trabajadores, es una fracción relativamente pequeña del total de los trabajadores expuestos como resultado de su ocupación, que se estima en alrededor de varias decenas de millones, de los cuales la mayoría están expuestos a fuentes naturales de radiación, alrededor de una decena de millones a fuentes médicas y el resto a otras fuentes artificiales. La gran mayoría de los trabajadores expuestos a la radiación se concentra en la minería, y el radón es la principal fuente de exposición en las minas subterráneas de todo tipo. En el cuadro siguiente se

resume la exposición al radón en el lugar del trabajo que estimaba UNSCEAR hace algunos años.

Exposición al radón en el lugar de trabajo

<i>Lugar de trabajo</i>	<i>Número de trabajadores (millones)</i>	<i>Dosis colectiva (hombre-Sv)</i>	<i>Dosis efectiva media (mSv)</i>
Minas de carbón	6,9	16 560	2,4
Otras minas ^a	4,6	13 800	3,0
Otros lugares de trabajo	1,25	6 000	4,8
		Media ponderada	2,9

^a *Se excluyen las minas de uranio.*

La mayor exposición ocupacional relacionada con la producción de electricidad de origen nuclear no ha estado ocurriendo en las centrales nucleares sino en otras partes del ciclo del combustible nuclear, principalmente en la minería de uranio. En lo que respecta al ciclo del combustible en general, la dosis efectiva anual media es de alrededor de 1,0 mSv. La dosis anual media de los trabajadores estudiados en el ciclo del combustible nuclear ha venido disminuyendo gradualmente desde 1975, de 4,4 mSv a 1,0 mSv en la actualidad. Ello se debe en gran medida a la reducción significativa de la extracción del uranio y la adopción de técnicas de minería más avanzadas; al mismo tiempo, la exposición profesional total en las centrales nucleares comerciales dividida por la energía producida también ha disminuido constantemente durante los últimos tres decenios (Ver Figura 32)

Dosis colectiva profesional anual de radiación ionizante en los reactores, normalizada por unidad de energía eléctrica producida, 1975-2002

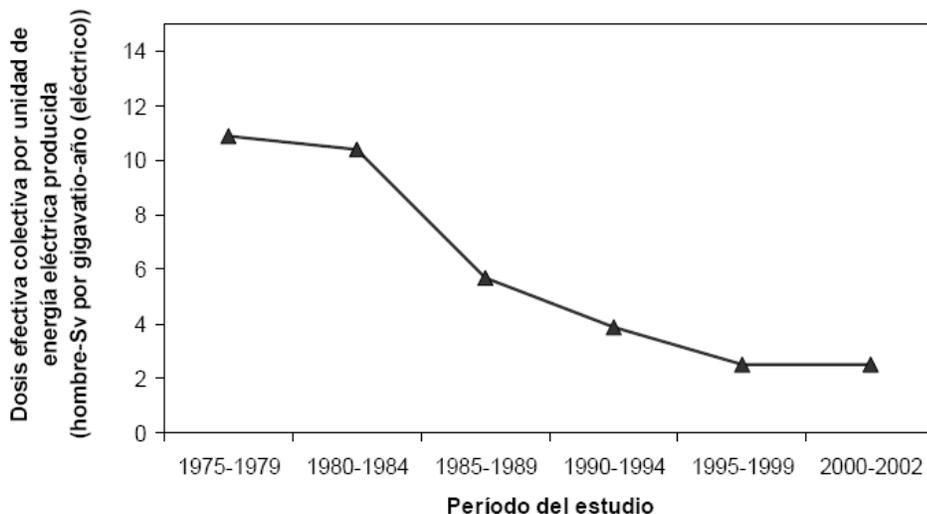


Figura 32. Exposición ocupacional en centrales nucleares

En el cuadro siguiente se presentan las tendencias de la dosis efectiva ocupacional media anual de radiación ionizante correspondiente a los períodos 1975-1979, 1980-1984, 1985-1989, 1990-1994, 1995-1999, 2000-2002. Como se puede observar, la dosis efectiva media disminuyó en todas las categorías de exposición a fuentes artificiales; la pronunciada disminución de la dosis respecto del ciclo del combustible nuclear se debe fundamentalmente a los cambios ocurridos en la extracción del uranio. Sin embargo, la dosis efectiva media ponderada general aumentó debido a una mayor exposición a fuentes de radiación naturales.

Tendencias de la dosis efectiva profesional anual media de radiación ionizante, 1980-1984, 1990-1994 y 2000-2002
(Milisievert)

<i>Fuente de exposición</i>	<i>1980-1984</i>	<i>1990-1994</i>	<i>2000-2002</i>
Fuentes naturales	..	1,8	2,9
Actividades militares	0,7	0,2	0,1
Ciclo del combustible nuclear	3,7	1,8	1,0
Usos médicos	0,6	0,3	0,5
Usos industriales	1,4	0,5	0,3
Varias	0,3	0,1	0,1
Media ponderada	1,3	0,8	1,8

Accidentología

Se ha producido un pequeño número de accidentes relacionados con el ciclo del combustible nuclear, los cuales han recibido amplia publicidad, notablemente los accidentes de Three Mile Island, de Chernobyl y de Fukushima Daiichi. Pero también han tenido lugar más de 100 accidentes con fuentes industriales y médicas, especialmente con las denominadas fuentes “huérfanas” (es decir, no sujetas a los controles reglamentarios), que han ocasionado lesiones y muertes a trabajadores y a la población. También han ocurrido accidentes durante el empleo médico de la radiación, casi siempre por error humano o mecánico durante aplicaciones de radioterapia. Aunque se sabe que los accidentes relacionados con fuentes huérfanas y los usos médicos de las radiaciones se han vuelto más frecuentes, es probable que las cifras actuales de las estimaciones reflejen niveles inferiores, o posiblemente muy inferiores, a los reales, debido a que los datos son incompletos.

El accidente que tuvo lugar en la central nuclear de Chernobyl en 1986 fue el más grave de la historia de la producción de energía nuclear con fines civiles. Dos trabajadores murieron inmediatamente después del accidente y 134 miembros del personal de la central y del personal de emergencia padecieron del síndrome de radiación aguda que provocó la muerte de 28 de ellos. Varios cientos de miles de trabajadores participaron posteriormente en las actividades de recuperación. Según algunos informes, entre las personas expuestas a las dosis de radiación más altas en 1986 y 1987 se observó una incidencia más alta de leucemia y catarata. En Belarús, Ucrania y cuatro de las regiones más afectadas de la Federación de Rusia se ha observado un notable aumento de la incidencia del cáncer del tiroides en personas que siendo niños o adolescentes en 1986 estuvieron expuestas a la radiación provocada por el accidente. En la actualidad no existe ninguna otra prueba firme de otros efectos de las radiaciones en la salud.(ver mas adelante para un tratamiento mas exhaustivo del accidente de Chernobyl).

Afortunadamente el serio accidente de Fukushima Daiichi no ha tenido consecuencias radiológicas significativas. Una discusión somera de las consecuencias radiológicas de ese accidente epilgará esta memoria.

En resumen, el Cuadro siguiente presenta las estimaciones más recientes de USCEAR de las dosis de radiación global, incluidos los de la energía nuclear:

Cuadro 1

Dosis media anual e intervalos de dosis individuales de radiación ionizante por fuente
(Milisievert^a)

<i>Fuente o tipo de exposición</i>	<i>Dosis media anual mundial</i>	<i>Intervalo típico de las dosis individuales</i>	<i>Observaciones</i>
Fuentes de exposición naturales			
Inhalación (gas radón)	1,26	0,2–10	La dosis es muy superior en algunas viviendas.
Radiación terrestre externa	0,48	0,3–1	La dosis es superior en algunos lugares.
Ingestión	0,29	0,2–1	
Radiación cósmica	0,39	0,3–1	La dosis aumenta con la altitud.
Total natural	2,4	1–13	Grupos de población importantes reciben entre 10 y 20 milisievert (mSv).
Fuentes de exposición artificiales			
Diagnóstico médico (excluida la terapia)	0,6	0–varias decenas.	La media correspondiente a distintos niveles de atención médica oscila entre 0,03 y 2,0 mSv; la media en algunos países es superior a la de la exposición a fuentes naturales; la dosis individual depende del tipo de examen aplicado.
Ensayos nucleares en la atmósfera	0,005	Pueden producirse algunas dosis más altas en las inmediaciones de los polígonos de ensayo.	La media ha disminuido después del valor máximo de 0,11 mSv registrado en 1963.
Exposición profesional	0,005	~0–20	La dosis media de todos los trabajadores es de 0,7 mSv. Casi siempre la dosis media y los niveles más altos de exposición se deben a la radiación natural (concretamente el radón en las minas).
Accidente de Chernobyl	0,002 ^b	En 1986, la dosis media recibida por más de 300.000 trabajadores de recuperación llegó a casi 150 mSv; y otras más de 350.000 personas recibieron dosis superiores a 10 mSv.	La media en el hemisferio septentrional ha disminuido de un valor máximo de 0,04 mSv registrado en 1986. La dosis tiroidea fue muy superior.
Ciclo del combustible nuclear (exposición de la población)	0,0002 ^b	La dosis llega hasta 0,02 mSv en grupos críticos a un km de distancia de algunos emplazamientos de reactores nucleares.	
Total artificial	0,6	Desde básicamente cero a varias decenas.	Las dosis individuales dependen fundamentalmente del tratamiento médico, la exposición profesional y la proximidad al polígono de ensayo o al lugar del accidente.

^a Unidad de medida de la dosis efectiva.

^b Radionúclidos dispersos a nivel mundial. El valor del ciclo del combustible nuclear representa la dosis anual máxima por persona que recibirá la población en el futuro, partiendo de la hipótesis de que la práctica continúe durante 100 años, y se debe fundamentalmente a los radionúclidos de periodo largo, dispersos a nivel mundial, liberados durante la reelaboración del combustible nuclear y el funcionamiento de las centrales nucleares.

La figura 33 presenta una visión simplificada de la distribución promedio de la exposición a las radiaciones ionizantes en el mundo. En los países con buena cobertura médica esta distribución se está alterando por la mayor incidencia de la exposición médica.

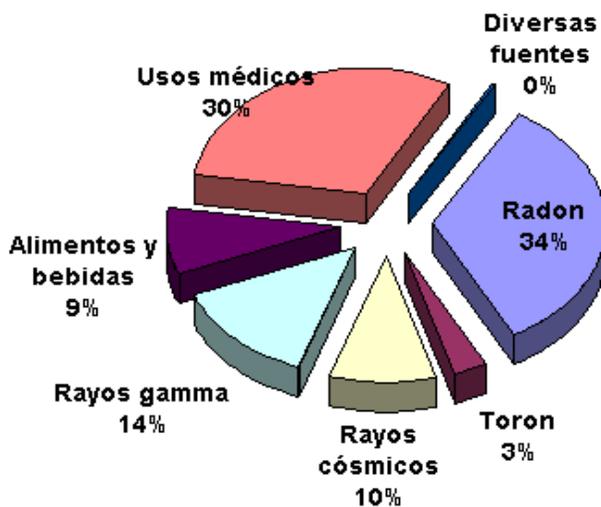


Figura 33. Distribución promedio de las fuentes de exposición a las radiaciones en el mundo

Efectos Biológicos derivados de la Exposición a la Radiación

En ningún ámbito de la investigación científica existe un mecanismo internacional para lograr un consenso mundial similar al establecido específicamente para la estimación de los efectos a la salud atribuibles a la exposición a la radiación ionizante. UNSCEAR reúne, desde hace casi medio siglo, a los principales especialistas mundiales para proporcionar la estimación más plausible de los riesgos sanitarios atribuibles a la radiación. UNSCEAR comunica periódicamente sus estimaciones a los 192 gobiernos del mundo a través de informes a la AGNU. Los detallados informes del UNSCEAR sintetizan las conclusiones de miles de referencias bibliográficas revisadas por pares homólogos. Aunque sin duda es inviable compendiar con precisión esta gran cantidad de información, el autor ha publicado varios resúmenes breves de las estimaciones de UNSCEAR dirigidos a un público amplio.

Mutación radio-inducida del ADN

Los efectos biológicos de las radiaciones derivan del daño que estas causan a la estructura química de la célula, en particular al ácido desoxirribonucleico (ADN) existente en el núcleo de la célula (ver Figura 34).

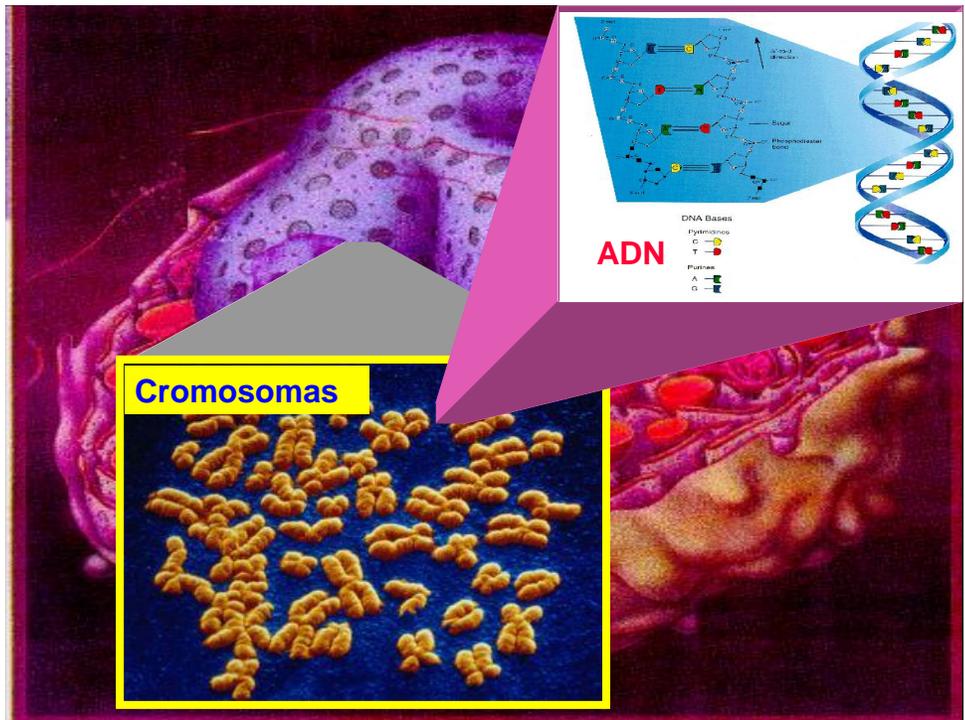


Figura 34. Célula humana con su núcleo, sus cromosomas y el ADN

El daño se expresa como cambios en el ADN que constituyen los genes contenidos en los cromosomas alojados en el núcleo celular (ver Figura 35). Estos cambios son denominados mutaciones. Cuando la mutación ocurre en células madre, se altera la información que pasa de una célula a su descendencia. Aunque la mutación del ADN esta sujeta a mecanismos restauradores eficientes, la reparación no esta libre de error. La mayor parte del daño se repara, pero es el daño remanente o mal reparado el que tiene consecuencias para la célula y su descendencia.

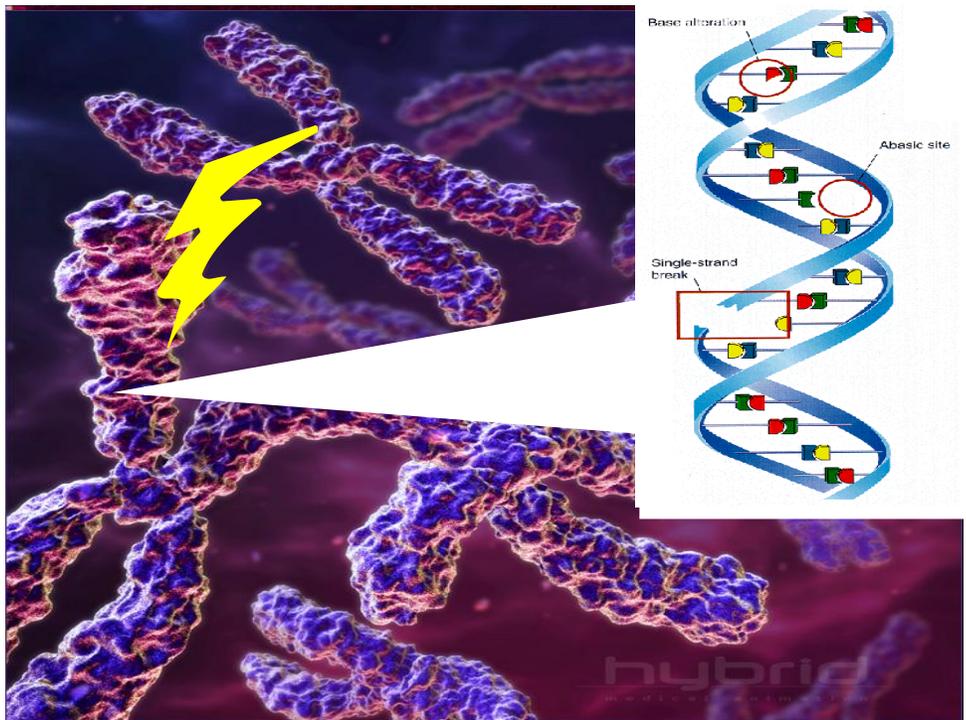


Figura 35. *Mutaciones inducidas por la radiación*

Existen datos experimentales que demuestran que las mutaciones del ADN producidas por una dada dosis de radiación, pueden ser reducidas si se expone la célula a una pequeña dosis de radiación ‘condicionante’ previa. Esto ocurre debido probablemente al estímulo de los mecanismos de reparación de las células. Visto que se reconoce que la eficacia de la reparación del ADN no es absoluta, la adaptación ocurre probablemente junto con los procesos de mutación del ADN y sus efectos subsiguientes. El balance entre la reparación celular estimulada y el daño residual todavía no resulta claro. Por otra parte, la respuesta celular ‘adaptativa’ es transitoria y además

parecen existir variaciones individuales, por lo que es ignorada en las estimaciones de riesgo.

Si la mutación del ADN depende de la interacción de la radiación con una sola célula, la frecuencia de esa mutación –en los casos en que no hubiera ninguna interacción entre las células– debería seguir una relación lineal-potencial (de potencia n) respecto de la dosis, debido a la posibilidad de interacciones múltiples (n). Normalmente, sin embargo, la relación es lineal-cuadrática debido que es muy improbable que haya mas de dos interacciones. Además, en el caso de dosis bajas de radiación, las interacciones únicas son más dominantes que los efectos de trazas múltiples, y la frecuencia de células con una o más interacciones es despreciable. En consecuencia, se estima que a bajas dosis la frecuencia de las mutaciones del ADN es simplemente proporcional a la dosis. En tal case, si una fracción de las mutaciones se mantiene sin reparar, el número esperado de células mutadas será proporcional a la dosis.

En resumen, si la radiación interacciona con el nuclear celular hay dos posibilidades: que nada ocurra o que ocurra una mutación en el ADN (ver Figura 36)

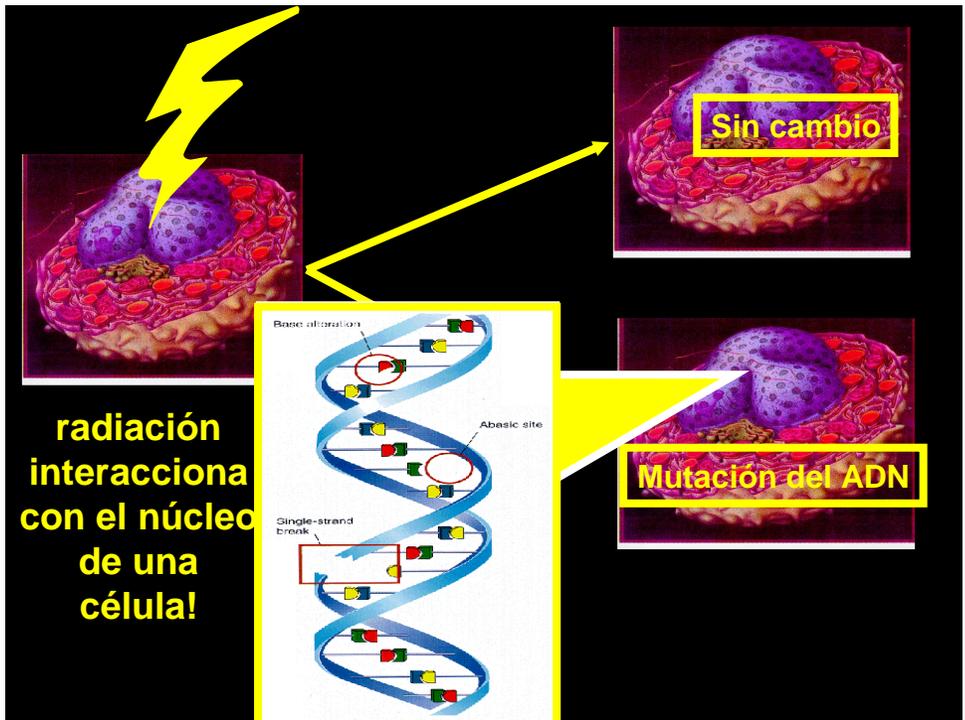


Figura 36. Posibles resultados de la exposición del núcleo celular a la radiación

La probabilidad, p_D , que a una determinada dosis, D , la radiación interaccione con una célula una o más veces, n , será:

$$p_D = (a D + b D^2 + \dots + n D^n) e^{-cD}$$

donde:

D es la dosis

a, b, ... n ... y c son constantes;
los términos 'n' reflejan una combinación de eventos n,
y
 e^{-cD} es la fracción de células supervivientes a la dosis,
D, es decir, la fracción de células que aún puede mutar.

Pero en el rango de dosis en la que la fracción de células supervivientes es significativa, los términos con potencia mayor a 2 son triviales. Entonces La probabilidad, p_D , de mutación a dosis, D, se transforma en

$$p_D = (a D + b D^2) e^{-cD}$$

que es la así llamada respuesta de dosis lineal cuadrática.

A bajas dosis la frecuencia de interacción es extremadamente baja: 1mSv/año equivale a 1 interacción/año/célula. Es decir que a bajas dosis de radiación se puede estimar que:

$$p_D = a D$$

que es la expresión que expresa la respuesta a bajas dosis.

La figura 37 resume la situación.

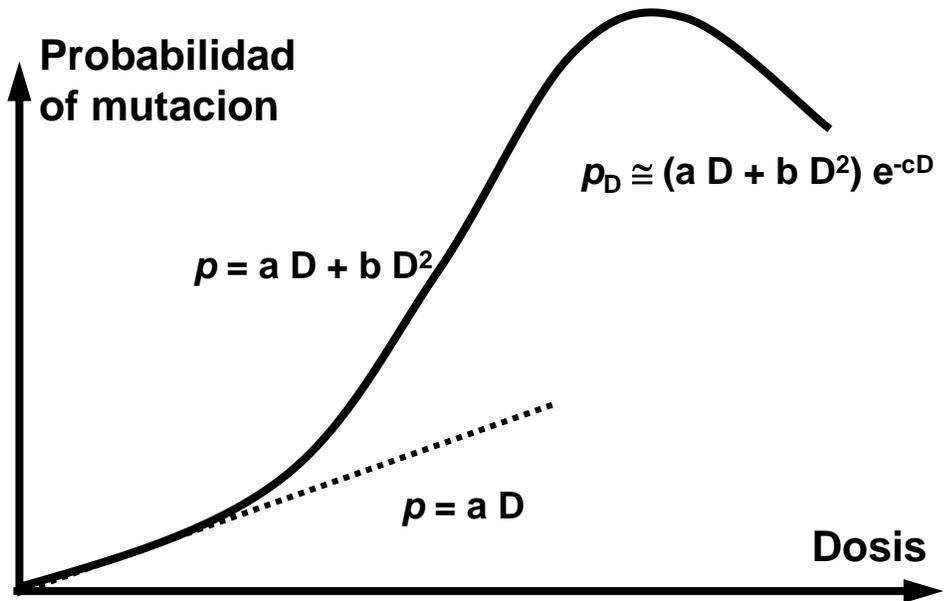


Figura 37. Probabilidad de mutación en función de la dosis

Ocurrida la mutación, puede haber tres resultados posibles, a saber: (i) la mutación es reparada por el eficiente mecanismo de reparación del ADN; (ii) la célula muere a causa de la mutación; ó, la célula continua siendo viable pero con un ADN distinto, mutado. La figura 38 ilustra estas posibilidades.

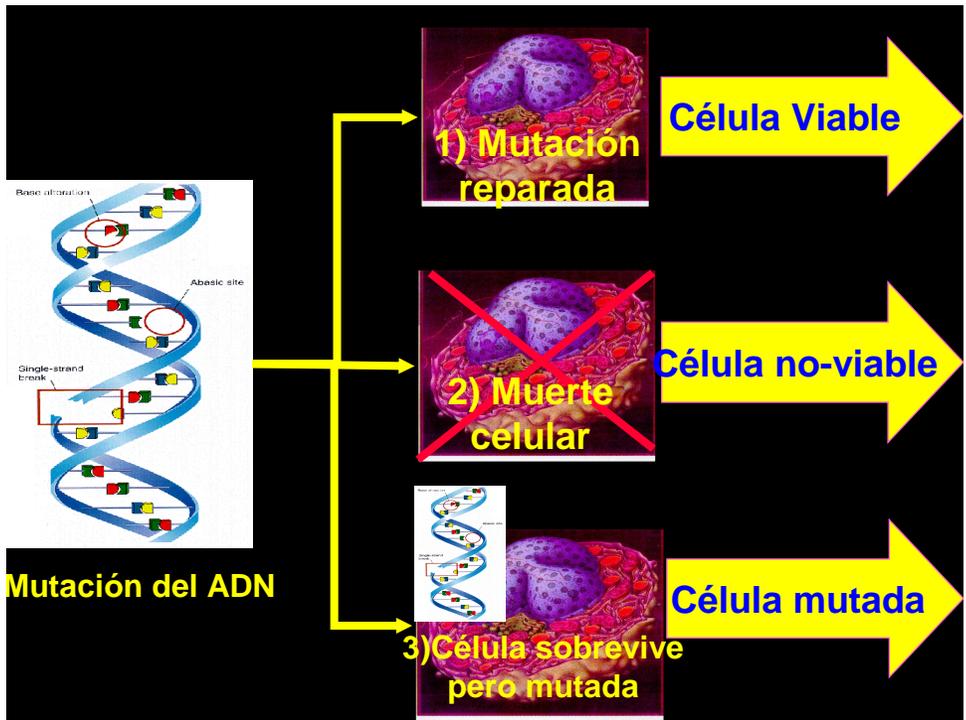


Figura 38. Resultados posibles de la mutación del ADN

Muerte celular radio-inducida: efectos deterministas.

Varias de las interacciones de la radiación con la célula y algunas de las mutaciones del ADN no reparadas pueden conducir a la muerte de la célula mutada, o impedir que esta tenga descendencia. Esto puede ocurrir como resultado de la necrosis celular (es decir, su muerte patológica como consecuencia de un daño irreversible causado por la radiación), de una apoptosis celular (es decir, la autodestrucción ante-programada de la célula causada por una mutación del ADN) o por la alteración del ciclo de reproducción celular normal. En el

caso de dosis bajas de radiación, la muerte celular es poco frecuente y, por lo tanto, no tiene consecuencias para la salud en vista de la redundancia de las funciones celulares y al reemplazo celular de las células muertas. En el caso de las dosis altas de radiación que podrían matar a un gran número de células en un órgano o tejido, la muerte celular puede ocasionar efectos titulares severos, y si se trata de tejidos vitales, puede llevar a la muerte al individuo afectado. Aunque la muerte de células individuales ocurre al azar, con una frecuencia que sigue la relación lineal-cuadrática con la dosis (antes descripta), los efectos sobre la salud resultantes de una muerte celular extensiva a dosis altas están predeterminados a ocurrir cuando la dosis supere un cierto nivel umbral, y es por ello que se denominan "*efectos deterministas*", aunque últimamente se prefiere denominarlos "*efectos tisulares*". Por lo tanto, generalmente los efectos deterministas no se expresan clínicamente a dosis bajas de radiación y su severidad esta relacionada con la dosis incurrida por los tejidos expuestos. Pero existen excepciones. Aun bajas dosis de radiación pueden causar efectos tisulares en el cristalino que incrementan su opacidad de una manera que parece ser directamente proporcional a la dosis. Mas aun, la muerte de unas pocas células esenciales durante el desarrollo orgánico en el útero puede producir efectos nocivos severos que se expresan clínicamente en el recién nacido; en general, estos efectos se denominan "efectos ante-natales" o "efectos sobre el embrión".

Transformación celular radio-inducida: efectos estocásticos.

Algunas mutaciones del ADN no reparadas pueden resultar en células viables pero modificadas. Si la célula madre modificada es una célula somática, la mutación original puede

ser la iniciadora de un largo y complejo proceso que puede conducir a efectos somáticos severos que resultan del proceso alterado de la célula mutada. Un de los resultados mas dramáticos de este tipo de mutaciones es la inducción de cáncer.

Alternativamente, si la célula mutada fuera una célula germinal, es decir una de las células involucradas en la generación de esperma u óvulos, la mutación podría expresarse coma "efectos hereditarios" en la descendencia de la persona expuesta.

Estos efectos sobre la salud, tanto somáticos como hereditarios, derivados de una modificación celular que ocasiona células mutadas pero viables, se denominan "efectos estocásticos", ya que su expresión es de naturaleza aleatoria, es decir que ocurren al azar, con una probabilidad que es proporcional a la dosis pero con una severidad que es independiente de la dosis.

La inducción de cáncer por las radiaciones

El término general cáncer se emplea para definir alteraciones importantes del modelo de crecimiento de las células primitivas en los órganos del cuerpo. Esas células suelen desarrollarse y dividirse de manera coordinada para formar las células especializadas del órgano, pero el crecimiento anormal y el desarrollo atrofiado pueden producir en determinado órgano una masa de células que se denomina tumor sólido. El crecimiento o desarrollo anormales en las células de la médula ósea o las células linfáticas primitivas pueden producir, respectivamente, leucemia y linfoma. Según el órgano de que se trate, el crecimiento libre del tumor y los ulteriores cambios celulares pueden provocar la propagación de la enfermedad maligna, que frecuentemente es mortal. El

cáncer es una enfermedad común en los organismos vivos y se debe a muchas causas. En el caso de los seres humanos y resulta una afección común que ocasiona casi una cuarta parte de las muertes en los países desarrollados y de una proporción cada vez mayor de las muertes en los países en desarrollo.

Existen pruebas epidemiológicas contundentes de que la exposición de los seres humanos a las radiaciones a niveles moderados y altos puede producir una incidencia excesiva de tumores sólidos en muchos órganos del cuerpo y de leucemia. También se tiene cada vez más información sobre los mecanismos celulares y moleculares que pueden dar lugar a esos tipos de cáncer. Sin embargo, todo aumento relativo de la incidencia del cáncer presuntamente causado por la exposición a radiaciones de dosis bajas es muy moderado en comparación con la incidencia de esta enfermedad.

Estudios epidemiológicos

Durante varios años UNSCEAR ha utilizado un sistema de exámenes evolutivos de todos los estudios de la incidencia del cáncer asociada con las radiaciones en poblaciones humanas que fueron expuestas a radiación. Se ha concedido especial atención al rigor conceptual de los estudios, incluido el examen de una gran variedad de posibles factores concomitantes y de la capacidad estadística de cualquiera de esos estudios de poner de manifiesto la incidencia excesiva del cáncer asociada con las radiaciones. En el análisis de UNSCEAR se incluye una evaluación de la capacidad estadística de los estudios, el potencial de error sistemático y otras fuentes de incertidumbre, entre ellas las vinculadas con las dosis de radiación recibidas. UNSCEAR también toma en consideración el método más adecuado para calcular el riesgo en poblaciones cuyas

características difieren de las de las poblaciones estudiadas (por ejemplo, el método de estimación del riesgo de una población sometida a radiaciones en alguna parte del mundo basándose en las estimaciones derivadas de poblaciones expuestas en otras partes del mundo).

La información epidemiológica sobre la incidencia del cáncer asociada con las radiaciones proviene de los estudios realizados con los sobrevivientes de las bombas atómicas lanzadas en el Japón, grupos expuestos a radiaciones en el entorno laboral, personas que reciben radiaciones durante tratamientos médicos y personas expuestas a fuentes medioambientales de radiación. En los últimos años también ha sido posible detectar incidencia excesiva del cáncer de pulmón en grupos de personas expuestas en sus hogares al gas radiactivo de origen natural radón y a los radio-nucleidos descendientes del decaimiento radioactivo del radón.

Al examinar todos esos estudios, se ha determinado que el conjunto de datos más informativo sobre la exposición corporal a las radiaciones proviene de los estudios hechos con los sobrevivientes de las bombas atómicas lanzadas en el Japón en 1945. La exposición a causa de las bombas atómicas consistió principalmente en radiaciones gamma de tasa de dosis alta, con un pequeño componente de neutrones. Estos datos se han utilizado para evaluar los riesgos de cáncer sólido asociado con las radiaciones, así como el riesgo de leucemia y de linfoma. Aunque las incertidumbres estadísticas y de otro tipo restringen los análisis de todos los conjuntos de datos, también ha sido posible examinar tendencias del riesgo de radiación asociado con el sexo, la edad en el momento de la exposición y el tiempo transcurrido desde la exposición y examinar además las posibles diferencias de riesgo entre poblaciones de distintas

partes del mundo. Hay algunos tipos de cáncer respecto de los cuales no se ha encontrado ninguna prueba de un riesgo excesivo tras la exposición a las radiaciones y otros tipos de cáncer en los que se advierte exceso de riesgo solo después de dosis altas de radiación. UNSCEAR estudió la variación de la sensibilidad a la inducción de cáncer sólido producido en distintos lugares del cuerpo, a partir de los datos sobre mortalidad de los sobrevivientes de las bombas atómicas lanzadas en el Japón, y pudo observar claramente diferencias sustanciales en el riesgo de inducción de cáncer en diversos órganos. A comienzos de la presente centuria, vivía aún el 45% de la cohorte de 86.611 sobrevivientes. De las 10.127 muertes por cáncer sólido debidas a todas las causas, se calcula que 479 estuvieron asociadas a la exposición a las radiaciones producidas por las detonaciones de las bombas, al igual que 93 muertes por leucemia de las 296 muertes por leucemia debidas a todas las causas.

Los datos epidemiológicos se han utilizado para examinar la relación entre la dosis de radiación recibida y el riesgo de inducción de cáncer, es decir, la relación dosis-respuesta. El exceso de riesgo relativo es una medida de la magnitud del aumento del riesgo de cáncer en la población objeto de estudio debido a las radiaciones en determinadas dosis (las cifras más altas indican mayor riesgo). En la figura 39 siguiente, los datos relativos a los sobrevivientes de las bombas atómicas lanzadas en el Japón respecto de todos los tipos de cáncer sólido combinados presentan el cuadro más claro de esa relación. La relación dosis-respuesta en la mortalidad vinculada con dosis bajas de radiación que se presenta en la figura puede representarse mediante una función tanto lineal como curvilínea. Las elevaciones del riesgo estadísticamente importantes se observan en dosis superiores a los 0.1 Sv.

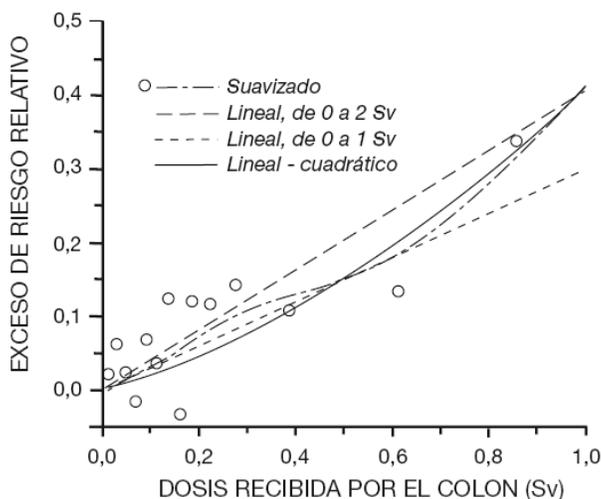


Figura 39. *Relación dosis-efecto correspondiente a la mortalidad por cáncer sólido sobre la base de los estudios realizados sobre los sobrevivientes de las bombas atómicas lanzadas en el Japón.*

Es poco probable que los estudios epidemiológicos por sí solos permitan cuantificar el riesgo muy por debajo de esos niveles. Es un proceso complejo extraer de todos los estudios informativos una estimación general del riesgo durante toda la vida de cáncer inducido por exposición a las radiaciones. Se han utilizado modelos matemáticos y datos relativos a las tasas subyacentes de cáncer en cinco poblaciones de diferentes regiones del mundo a fin de analizar esa cuestión, pero reconoce plenamente las incertidumbres presentes en las estimaciones. Las estimaciones actuales relativas al riesgo de cáncer mortal inducido por radiaciones se presentan en el cuadro siguiente. Las estimaciones del riesgo varían según la edad, y las personas

más jóvenes suelen ser más sensibles a las radiaciones; los estudios sobre la exposición a las radiaciones en el vientre materno indican que el feto es particularmente sensible a las radiaciones.

Cuadro: Exceso de riesgo de mortalidad a lo largo de la vida (promedio de ambos sexos).

(

Dosis Aguda (Gy)	Cánceres sólidos combinados % para la dosis especificada	Leucemia % para la dosis especificada
0.1	0.36 – 0.77	0.03-0.05
1.0	4.3-7.2	0.6-1.0

Efectos hereditarios de la exposición a las radiaciones

Mientras que los efectos de la irradiación relacionados con el cáncer se manifiestan en los órganos de las personas directamente expuestas a las radiaciones, los efectos hereditarios se originan en daños causados al ADN de las células germinales (la esperma y los óvulos) en los órganos reproductivos (los testículos en los hombres y los ovarios en las mujeres) de las personas expuestas. Si el daño causado en el ADN produce mutaciones en las células germinales, estas pueden transmitirse a los descendientes de la persona irradiada

y demás generaciones futuras. Una parte de esas mutaciones serán la causa directa de enfermedades hereditarias dominantes. Otras mutaciones actúan indirectamente mediante la interacción con otros genes y modos de vida o con factores ambientales para causar enfermedades poligénicas crónicas. De todas formas, ambas clases de enfermedades se producen de manera natural y contribuyen a defectos de nacimiento (anomalías congénitas) en la descendencia.

Sin embargo, a diferencia de los estudios sobre el cáncer asociado a las radiaciones, los estudios epidemiológicos no han dado indicios claros de exceso de efectos hereditarios como resultados de la exposición a las radiaciones en los seres humanos. El estudio más amplio y exhaustivo de este tipo se realizó utilizando datos de hijos de los sobrevivientes de las bombas atómicas lanzadas en el Japón. Ni en ese ni en ningún otro estudio con seres humanos se observó aumento alguno en la frecuencia de los efectos hereditarios. Mas aun, estudios sobre la incidencia de deformaciones congénitas en un gran número de recién nacidos en las zonas de altos niveles de radiación de fondo natural en la India y China no indican un aumento en la frecuencia de las deformaciones. Por consiguiente, esos estudios no permiten hacer una estimación directa de ningún riesgo hereditario de la exposición a las radiaciones. Tampoco confirman que no existan riesgos de efectos hereditarios, ya que resulta difícil detectar un pequeño exceso de incidencia asociado a la exposición a las radiaciones por encima de una incidencia bastante alta en poblaciones no sometidas a radiaciones.

La falta de evidencia epidemiológica es útil porque ofrece un límite superior para la estimación de todo riesgo conexo e indica que si los efectos hereditarios en el hombre existieran, su

riesgo sería tan bajo como para ser indetectable. Pero esta ausencia de prueba no significa que no haya riesgo de estos efectos. La demostración más clara de los efectos hereditarios de la exposición a las radiaciones en mamíferos proviene de extensos estudios experimentales con animales sometidos a altas dosis de radiación, en particular los realizados con ratones de laboratorio. Se han examinado y analizado los datos sobre mutaciones obtenidos en esos estudios, sobre todo a la luz de nuevos datos sobre los tipos de mutaciones del ADN en las células germinales (en su mayoría, pérdidas de ADN) y la forma en que se vinculan con los efectos hereditarios en la descendencia. Internacionalmente se ha adoptado la llamada dosis de duplicación de las mutaciones como medida de los efectos hereditarios de la exposición a las radiaciones. La dosis de duplicación de radiación es aquella que producirá en una generación tantas nuevas mutaciones como las que se producen espontáneamente. Hasta hace poco, se calculaba que la dosis de duplicación derivada únicamente de estudios con ratones era de 1 gray, la cual se aplicaba para calcular los efectos hereditarios en poblaciones de seres humanos sometidas a la exposición en dosis bajas a lo largo de muchas generaciones. Hace unos años, se revisaron los métodos de cálculo con miras a:

- a) Incluir nuevas estimaciones de la tasa de mutación espontánea en los seres humanos;
- b) Tener en cuenta los efectos mortíferos de algunas mutaciones en el desarrollo del embrión y otros efectos que desaparecerán de la población, ya que impiden la reproducción humana o reducen notablemente la probabilidad de reproducción;
- c) Utilizar una relación revisada entre la introducción de mutaciones nuevas en la población y la incidencia de enfermedades hereditarias.

Teniendo en cuenta las citadas revisiones y otros análisis, se logró presentar no solo una nueva estimación del riesgo de enfermedades hereditarias

dominantes monogénicas, sino también, y por primera vez, una estimación del riesgo de enfermedades poligénicas. Esas estimaciones se muestran en el cuadro siguiente. Tal vez los rápidos avances en la tecnología relativa a la secuenciación del ADN y en el conocimiento de la variación genética humana aporten información más directa en el futuro sobre el riesgo hereditario.

Cuadro. Estimaciones del riesgo de enfermedades hereditarias en la generación siguiente a causa de la exposición de la población madre a radiaciones de dosis bajas.

Clase de enfermedad	Frecuencia de referencia (por cada millón de personas)	Riesgo en la primera generación por unidad de dosis de transferencia lineal de energía (TLE) baja ^a (por cada millón de personas expuestas a 1 gray)
Dominante (incluidas las enfermedades ligadas al cromosoma X)	16.500	~750-1.500
Cromosómica	4.000	^b
Enfermedades poligénicas crónicas	650.000	~250-1.200
Anomalías congénitas	60.000	~2.000

^a Entre los tipos de radiación con transferencia lineal de energía (TLE) baja figuran los rayos X, los rayos gamma y las partículas beta.

^b Se supone que queda subsumido en parte en el riesgo de enfermedades autosómicas dominantes y de enfermedades ligadas al cromosoma X y en parte en el riesgo de anomalías congénitas.

Efectos sobre el embrión

Los efectos de la radiación *in utero* se denominan generalmente efectos sobre el embrión. Pueden producirse en todas las etapas del desarrollo embrionario, desde el cigoto hasta el feto, e incluir efectos mortales, malformaciones, retraso mental e inducción de cáncer. Los tres primeros pueden ser el resultado posible de efectos deterministas durante el desarrollo embrional, particularmente durante el período de formación de los órganos.

En algunos niños expuestos *in útero* en el bombardeo de Hiroshima y Nagasaki se observaron casos de retraso mental severo, de los cuales se han obtenido datos relativos a los efectos de la radiación sobre el crecimiento y desarrollo del cerebro. Los efectos debidos a la exposición *in útero* a dosis y tasas de dosis altas, vinculada en particular al período entre las 8 y 15 semanas después de la concepción, parecen indicar una tendencia descendente en la distribución del cociente intelectual (IQ). En el caso de las dosis bajas de radiación, este posible efecto sobre el embrión no es detectable en el recién nacido. Los estudios de exposiciones *in útero* han proporcionado datos conflictivos en lo que respecta a la carcinogénesis en los niños: desde riesgos relativamente altos hasta riesgos esencialmente no detectables, incluyendo un (posible) riesgo nulo. No existe ninguna razón biológica para suponer que el embrión es resistente a la carcinogénesis, pero sobre la base de los datos actualmente existentes no es posible cuantificar de manera segura tales efectos.

Otras Enfermedades (no-cancerígenas) Asociadas a las Radiaciones

Hay un cúmulo de pruebas de que el riesgo de contraer otras enfermedades comunes además del cáncer puede aumentar tras la irradiación, por lo menos en casos de exposición a dosis de moderadas a altas. Esas pruebas nacen en su mayoría de estudios epidemiológicos de los datos de los sobrevivientes de las bombas atómicas lanzadas en el Japón, en particular los relativos a trastornos circulatorios. Si bien el UNSCEAR examinó la incidencia de estas enfermedades en los estudios sobre los sobrevivientes de las bombas atómicas y de otros grupos sometidos a radiaciones, tropezó con dificultades epistemológicas como, por ejemplo, los fuertes antecedentes de incidencia de esas enfermedades en las poblaciones no sometidas a radiación; la consideración debida de otros factores además de la exposición a las radiaciones (por ejemplo, el tabaquismo, los índices de colesterol, la predisposición hereditaria); y la ausencia de mecanismos celulares conocidos que intervinieran en su evolución. El único indicio claro de exceso de riesgo de enfermedad cardiovascular mortal asociado a la exposición a las radiaciones, en dosis de radiación al corazón por debajo de, aproximadamente, 1 a 2 gray, proviene de los datos sobre los sobrevivientes de las bombas atómicas. Los demás estudios examinados por el UNSCEAR aportaron indicios de exceso de enfermedades cardiovasculares en casos de radiaciones de dosis más altas. En cuanto a todas las demás enfermedades no cancerosas combinadas, UNSCEAR llegó a la misma conclusión general que en el caso de las enfermedades cardiovasculares: el Comité no logró arribar a ninguna conclusión sobre una relación causal directa entre la irradiación en dosis por debajo de, aproximadamente, 1 a 2 gray y el exceso de incidencia de enfermedades cardiovasculares y otras

enfermedades no cancerosas. Aún no están claras las características de la relación dosis-respuesta de esas enfermedades frente a dosis bajas de radiación. Si bien estudios epidemiológicos recientes vienen arrojando resultados que indican que existe un riesgo elevado de enfermedades no cancerosas ante dosis de radiación por debajo de 1 a 2 gray y, en algunos casos, dosis mucho menores, todavía no se tiene claro cuáles son los mecanismos conexos y la estimación del riesgo en casos de dosis bajas de radiación sigue siendo problemática. Se trata de un campo en que se investiga con intensidad, y el UNSCEA seguirá manteniendo bajo examen las novedades que se produzcan al respecto.

También se han observado en estudios recientes indican que se puede asociar una mayor incidencia de cataratas y opacidades en el cristalino y la exposición a radiaciones de dosis bajas. Desde hace algunos años se había reconocido que la inducción de esas anomalías en el cristalino era un efecto de la exposición a radiaciones de dosis altas pero no bajas. Como ocurre con los trastornos circulatorios, los nuevos resultados que se obtengan en las investigaciones en ese campo se seguirán examinando.

Además, se mantendrán bajo examen los mecanismos de posible importancia para explicar las enfermedades inducidas por las radiaciones, como la inestabilidad genómica y los efectos circunstantes, así como los nuevos conceptos y tecnologías que puedan contribuir a un conocimiento más cabal de los efectos en la salud de la exposición a las radiaciones en dosis bajas y de los mecanismos que explican esos efectos.

Efectos en el sistema inmunológico

También se han realizado evaluaciones de los efectos de la radiación en el sistema inmunológico. En principio, si la radiación sirve para que aumente o disminuya la capacidad del organismo de dar una respuesta inmunológica a una infección, al cáncer o a alguna otra enfermedad, ello podría repercutir en el riesgo de toda enfermedad debida a la exposición a las radiaciones. Aunque se examinaron muchos estudios, no fue posible formarse una opinión clara en el sentido de si los efectos en el sistema inmunológico provocados por las radiaciones en dosis bajas servían para estimular o inhibir las respuestas inmunológicas.

Resumen de los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones

La Figura 40 presenta un resumen simplificado de la probabilidad de daño en función de la dosis de radiación incurrida. A dosis superiores a 1 gray o 1 sievert comienzan a aparecer los efectos determinísticos y a dosis de varios grays o sieverts la probabilidad de daño de hace asintótica a uno o certeza.

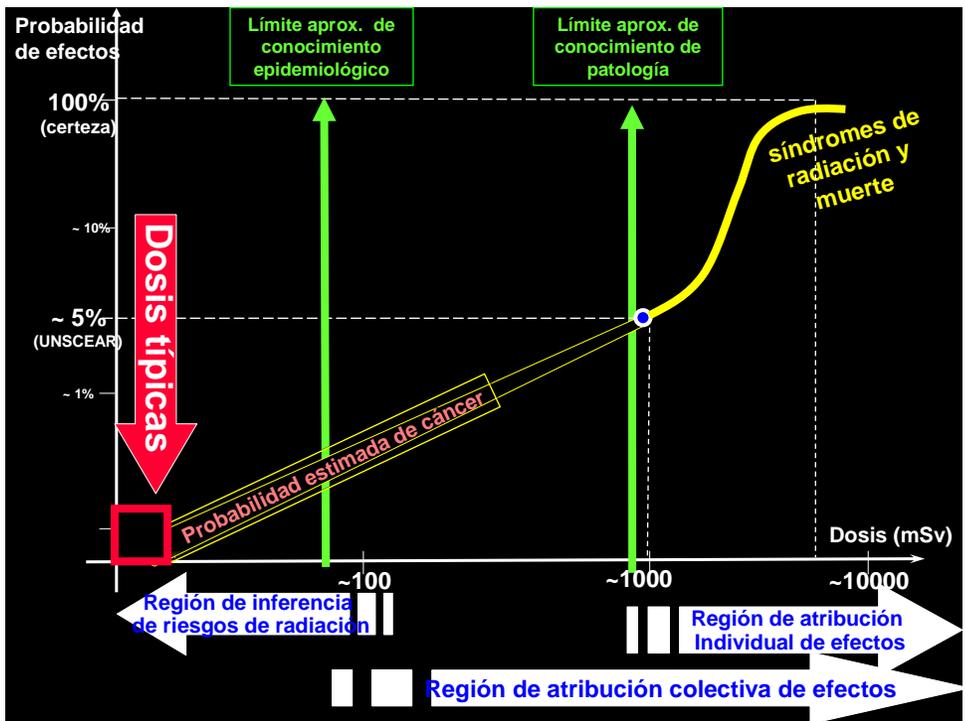


Figura 40. Resumen simplificado de la probabilidad de daño en función de la dosis incurrida

Pero las dosis típicas son generalmente muy bajas y en esa zona solo se puede estimar el riesgo de daño sobre la base de los estudios epidemiológicos disponibles en seres humanos expuestos a dosis de radiación relativamente alta, de los que se puede coleccionar lo siguiente:

- (1) El riesgo de mortalidad durante toda la vida (un promedio de ambos sexos) es:

- (i) para todos los cánceres sólidos combinado 3,6 a 7,7% por Sv para una dosis aguda de 0.1 Sv y 4.3 a 7.2% por Sv para una dosis aguda de 1 Sv, y,
- (ii) para la leucemia 0.3-0.5% por Sv para una dosis aguda de 0.1 Sv y 0,6 a 1,0% por Sv para una dosis aguda de 1 Sv.

(2) El riesgo de enfermedades hereditarias de una generación debido a la exposición a dosis bajas y concluyó que el riesgo de primera generación (por unidad de dosis baja LET) son :

- (i) para los efectos dominantes (como la función X-enfermedades alineados) ~ 750 a 1 500 por millón de habitantes en relación gris-a-vis con una frecuencia inicial de 16 500 por millón;
- (ii) para las enfermedades crónicas multifactoriales ~ 250 a 1 200 por millón de habitantes en relación gris-a-vis con una frecuencia inicial de 650 000 por millón, y,
- (iii) para las anomalías congénitas ~ 2 000 millones de euros al gris vis-à-vis con una frecuencia inicial de 60 000 por millón (efectos cromosómicos se supone que es subsumido en parte bajo el riesgo de enfermedades autosómica dominante y ligada al cromosoma X- y en parte en virtud de que las anomalías congénitas).

Es decir que para una población expuesta a la radiación en una sola generación, los riesgos para la descendencia de la primera generación posterior a la radiación se estima que entre 3.000 y 4.700 casos por cada gris por cada millón de descendientes, lo que constituye 0,4 a 0,6 por ciento de la frecuencia de línea de base de los trastornos en la población humana.

La Figura 41 presenta un esquema de cómo se utilizan valores derivados de estas estimaciones en la práctica, con una aproximación de riesgo total de 0.005%/mSv.

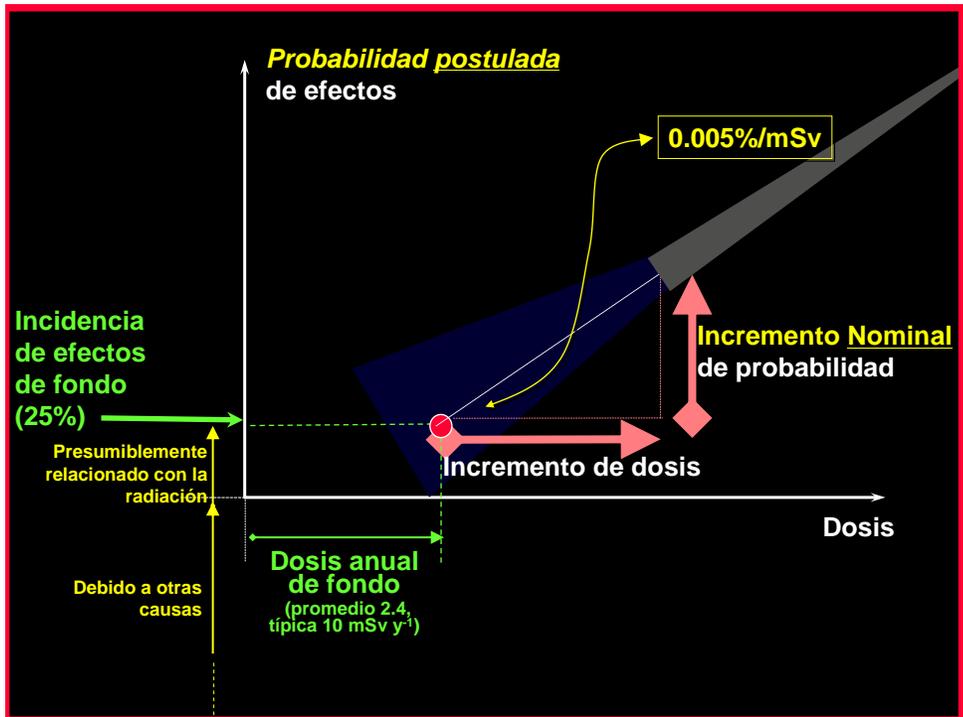


Figura 41. El riesgo inferido a dosis muy bajas

Cabe señalar, sin embargo, que estas estimaciones están asociadas con incertidumbres inevitables. Los procesos que ocurren a partir de la ionización de la materia viva por la exposición a la radiación hasta la expresión de los efectos perjudiciales para la salud atribuibles son muy complicados y sólo se pueden evaluar con un alto grado de incertidumbre. Para los efectos estocásticos se extienden durante períodos de

tiempo diferentes: la interacción física que tiene lugar en millonésimas de microsegundos, las interacciones físico-químicas que ocurren en milésimas de microsegundos a milisegundos, la respuesta biológica que se plantean en segundos hasta días, y los efectos estocásticos médica expresó después de años, décadas y en el caso de efectos hereditarios, probablemente siglos.

Teniendo en cuenta estas estimaciones se recomienda que, con propósitos de protección radiológica, se deben utilizar coeficientes de riesgo *nominales* ajustados al detrimento. Estos coeficientes son números expresados en % por unidad de dosis, lo que - multiplicado por la dosis - tienen por objeto cuantificar la probabilidad subjetiva, plausibilidad o "grado de creencia" de que ocurran efectos latentes como resultado de la exposición a la radiación. Los coeficientes son nominales, en el sentido de que no se corresponden necesariamente con un valor real, puesto que se refieren a personas hipotéticas (no reales), las que representan un promedio de edad y sexo de las reales. Dado que los posibles diferentes efectos pueden causar perjuicios (o 'detrimento') diferentes a las personas, los coeficientes son multidimensionales, i incluyen la cuantificación de la expectativa plausible de daño, o detrimento, la que incluye entre otras cosas, la verosimilitud ponderada de los daños fatales y no fatales, y la pérdida de vida si el daño realmente ocurre.

Los coeficientes de ajuste nominal en detrimento de riesgo recomendados actualmente son las siguientes:

Coeficientes nominales de riesgo ajustados al detrimento
(expresados en 10^{-2} Sv^{-1}) para efectos estocásticos después de la
exposición a la radiación a tasa de dosis baja)

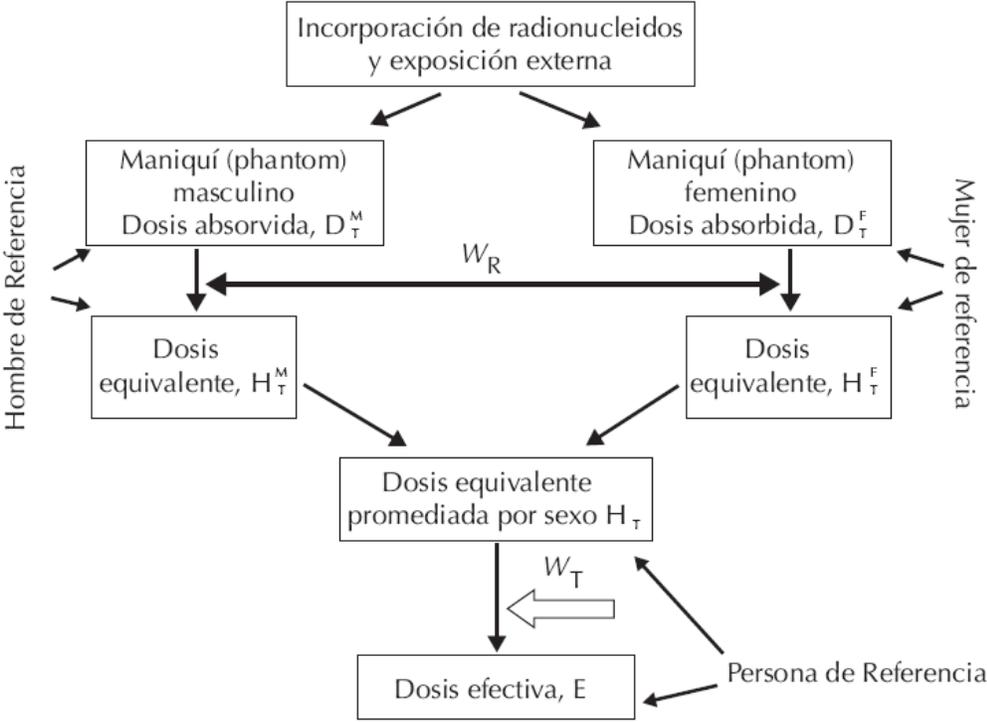
[en comparación a los de la publicación 60 de la ICRP de hace una década]

Población expuesta	Cáncer		Efectos heredables		Total	
	Actual ¹	Pub. 60	Actual ¹	Pub 60	Actual ¹	Pub 60
Toda	5,5	6,0	0,2	1,3	5,7	7,3
Adultos	4,1	4,8	0,1	0,8	4,2	5,6

Los coeficientes de riesgo implican la asunción de una relación lineal dosis-respuesta para la inducción de cáncer y efectos hereditarios, según la cual un incremento en la dosis induce un incremento proporcional en el riesgo, incluso a dosis bajas. Este supuesto es fundamental para la aplicación práctica del sistema de protección contra las radiaciones (véase más abajo), y sienta las bases para la suma de las dosis, de diferentes fuentes, y de la exposición externa con la debida a la incorporación de radionucleidos [Beninson, 1996] .

Se vuelve a insistir en que los coeficientes de riesgo son nominales, es decir, artificialmente construido a partir de modelos basados en maniqués (o fantomas) que representan un promedio de una persona normalizada. Es decir que la evaluación de las dosis equivalentes a un hombre y mujer de referencia y de la dosis efectiva a una persona de referencia está basada en la utilización de modelos antropomórficos expresados en maniqués o fantomas. Estos modelos son representaciones computacionales del hombre y la mujer de referencia y se usan para computar la dosis absorbida media, D_T , en un órgano o tejido T, debidas a campos de radiación de referencia externos al cuerpo y al decaimiento de radionucleidos después de la incorporación. Ellos se emplean para el cálculo de

los coeficientes de conversión de dosis para los campos de radiación externos y de los coeficientes de dosis para la incorporación de radionucleidos. Estas dosis a los órganos o tejidos son multiplicadas por el factor de ponderación de la radiación para dar las dosis equivalentes en órganos y tejidos del hombre y la mujer de referencia. El siguiente gráfico indica como se construye la dosis efectiva con estos maniqués:



Las normas internacionales de seguridad radiológica han tomado estas estimaciones y recomendaciones y han redondeado un coeficiente nominal genérico de riesgo de $\sim 5\%$ Sv⁻¹, como base de los requisitos para limitar los riesgos de la radiación. Esto es porque se considera plausible que haya riesgos atribuibles a la exposición a la radiación, incluso a dosis bajas, y por lo tanto, por razones de deber social, responsabilidad, utilidad, prudencia y precaución, es éticamente necesario que los organismos reguladores atribuyan tales riesgos. Sin embargo, debe quedar en claro que mientras que el coeficiente nominal puede ser utilizado como inferencia riesgo, no puede ser utilizado para atribuir efectos concretos a la exposición a las radiaciones.

Efectos y riesgos en situaciones de exposición a dosis bajas

En general las situaciones de exposición a la radiación a dosis suficientemente altas como para generar efectos determinísticos son raras. Lo común es que las dosis se encuentren por debajo de los umbrales de estos efectos. Es por eso que se ha prestado una particular atención a examinar información sobre los efectos de la exposición a la radiación de bajas dosis en la salud. Un objetivo esencial es ofrecer estimaciones basadas en pruebas del riesgo que para la salud humana entraña la exposición a radiaciones de dosis bajas y tasas de dosis baja en la población en general, los trabajadores y las personas sometidas a intervenciones médicas en todo el mundo.

Si bien no existe una convención universalmente aceptada, en general, se entiende por dosis bajas las de 200 miligray o menos y por tasas de dosis baja las de 0,1 miligray

por minuto (promedio de una hora o menos) en el caso de radiaciones como los rayos X y los rayos gamma externos.

Se han elaborado estimaciones internacionales del riesgo relativas a los efectos carcinógenos y hereditarios de las radiaciones. Estas estimaciones se hacen sobre la base de dos tipos de información, a saber: los resultados de estudios sobre el exceso de enfermedades en poblaciones sometidas a radiaciones, por lo general de dosis moderadas o altas (por ejemplo, los resultados obtenidos a partir de estudios epidemiológicos); y, los resultados de estudios en que se utilizan modelos experimentales de enfermedades (por ejemplo, con animales y cultivos de células, a menudo acompañados de estudios de los efectos de las radiaciones a nivel subcelular, bioquímico y molecular) que pueden proporcionar información sobre el mecanismo por el cual se produce el efecto biológico o la enfermedad.

Debido a que las enfermedades de interés pueden ser relativamente comunes y a que en su incidencia pueden influir factores ajenos a la exposición a la radiación, las observaciones epidemiológicas no suelen arrojar pruebas claras del aumento de la incidencia vinculado a las radiaciones de dosis bajas. Por tal motivo, se procura utilizar al máximo los conocimientos más avanzados derivados de estudios experimentales y los conocimientos relativos al fundamento mecanicista de las enfermedades humanas.

Al hacer estimaciones del riesgo para la salud, se consideran a las poblaciones y no a la persona individual. Hay cada vez más pruebas de que los factores genéticos y de otra índole pueden incidir en el riesgo de enfermedad; tal vez en el

futuro se logre profundizar los conocimientos sobre esos factores.

Cuando se trata de atribuir a la exposición a las radiaciones de dosis bajas casos específicos de enfermedad surgen muchos problemas, como por ejemplo: *a)* La falta de especificidad en el tipo o las características de la enfermedad inducida por la exposición a las radiaciones; *b)* El período largo (de años o decenios) que media entre la exposición a las radiaciones y la aparición de la enfermedad; *c)* La elevada incidencia espontánea de enfermedades vinculadas con las radiaciones en la población en general de edad avanzada. Atendiendo a una petición concreta de la Asamblea General de las Naciones Unidas, el UNSCEAR ha elaborado un informe que analiza la posibilidad de atribuir científicamente de manera retrospectiva determinados efectos en la salud a la exposición a las radiaciones de dosis bajas y de inferir prospectivamente un riesgo a la exposición a estas radiaciones.

Atributabilidad de riesgos y efectos potenciales de salud a las centrales nucleares.

El reconocimiento de los riesgos de la radiación y de los efectos sanitarios concretos derivados de situaciones de exposición a la radiación, en particular los relacionados con las dosis bajas registradas en la mayoría de las actividades con radiación, es un tema delicado. En primer lugar existe un problema legal, la figura jurídica de la causalidad y consiguiente imputabilidad que es común en los litigios laborales [OIT, 2010]. Pero el objetivo de esta parte de la memoria es centrarse en la epistemología de la cuestión, es decir, con las teorías actuales del conocimiento sobre los efectos de salud de la radiación en dosis bajas, especialmente en lo que

respecta a los métodos, la validez y el alcance de las teorías. A partir de esta base epistemológica, se podría aclarar uno de los mayores enigmas en las ciencias de la radiación: si los riesgos de radiación deben inferirse y si efectos asociados a la radiación son atribuibles a las operaciones de las centrales nucleares.

Mientras que la atribución de riesgo de radiación está asociada al concepto de probabilidad, la atribución de efectos de la radiación debe basarse en el concepto de demostrabilidad. Estos dos conceptos son sutilmente diferentes. La probabilidad es una magnitud caracterizable e inferible a través de técnicas estadísticas y de métodos bayesianos formales. Por el contrario, la demostrabilidad parece ser una magnitud no cuantificables que describe la capacidad de demostrar, mediante pruebas la incidencia real de efectos de la radiación. Por lo tanto, sobre la base de la evidencia disponible, las nociones de inferencia de riesgo y atribución de efectos deberían ser dilucidados. Lo que sigue es una síntesis de la posición de las Naciones Unidas sobre este tema

Atributabilidad de efectos deterministas: Los efectos deterministas se pueden atribuir a las exposiciones de las centrales nucleares con un alto grado de confianza bajo las siguientes condiciones:

- (i) la dosis incurridas deben ser más alta que la dosis umbral para el efecto específico, los que en general son muy altos, de mas de un sievert (una excepción es la exposición a la radiación al cristalino del ojo, la que aun relativamente baja, puede ser suficiente para inducir opacidad, una situación familiar en la radiología intervencionista, pero que no debería ocurrir en las centrales nucleares); y,

- (ii) debe existir un diagnóstico radio-patológico inequívoco del efecto, el que además debe garantizar que hayan sido excluidas posibles patologías competitivas.

Sólo bajo estas condiciones, los efectos pueden ser adecuadamente acreditados y atribuidos a la exposición.

Atributabilidad de efectos estocásticos: Por el contrario, los efectos malignos o hereditarios no se pueden atribuir inequívocamente a la exposición a la radiación sobre bases individuales por razones de contrafactualidad condicional. Esto se debe a exposición a que la radiación no es la única causa posible de este tipo de efectos y, en la actualidad, no hay marcadores biológicos disponibles para estos efectos que sean específicos para la exposición a la radiación.

Sin embargo, aunque la aparición de efectos malignos (o de efectos hereditarias en la descendencia) no pueda ser inequívocamente atribuible a la radiación de forma individual, una mayor incidencia de estos efectos en una población puede teóricamente atribuirse a la radiación de forma colectiva. Esta atribución colectiva puede establecerse a través del análisis epidemiológico bajo las siguientes condiciones:

- (i) el número de casos de los efectos en la población expuesta debe ser suficiente para superar las incertidumbres aleatorias inherentes a la estadística en los análisis epidemiológicos y,
- (ii) el aumento de la prevalencia colectiva de los efectos en la población expuesta debe estar debidamente acreditada mediante procedimientos radio-epidemiológicos calificados.

En situaciones de exposición crónica a niveles similares a los derivados de las operaciones normales de las centrales nucleares, el número teórico de nuevos casos de tumores malignos en una población sería tan bajo que la atribución es imposible ya sea individual o colectivamente.

Así, mientras que una mayor incidencia de tumores malignos y los efectos hereditarios podrían teóricamente ocurrir en las poblaciones expuestas a las centrales nucleares, dado que no es factible la obtención de pruebas científicas inequívocas de que muestren esos efectos, ellos no pueden ni deben considerarse atribuibles ni utilizarse de forma prospectiva en las proyecciones teóricas de daño de radiación. Por otra parte, los efectos hereditarios en la actualidad no pueden atribuirse a la exposición a la radiación, incluso a dosis altas, debido a que la fluctuación de la incidencia normal de estos efectos es mucho más grande que cualquier aumento previsto de la incidencia relacionado con la radiación.

Si bien la atribución de algunos de los efectos malignos de exposición a la radiación no puede ser sancionada de manera inequívoca sobre una base individual, sin embargo, es de señalar, sin embargo, que en algunos casos la atribución puede ser ostensible, es decir, aparente de hecho, aunque no necesariamente demostrable formalmente. La atributabilidad de efectos malignos inducibles por la radiación en individuos puede ser ostensible cuando:

- (i) la incidencia de «base» del efecto es baja, y
- (ii) la radio-sensibilidad del efecto en particular es alta.

Un ejemplo típico de atributabilidad ostensible es la del cáncer folicular de tiroides en los niños expuestos a dosis

relativamente altas de tiroides, tales como los ocurridos después del accidente de Chernobyl.

Atributabilidad de daños celulares: Debe tenerse en cuenta que los efectos de la radiación pueden ocurrir en células humanas expuestas a niveles relativamente altos de radiación. Estos efectos pueden ser detectados a través de muestras de bioensayos especializados, como algunas muestras hematológicas y citogenéticas. Los efectos pueden ser utilizados como indicadores biológicos de la exposición y puede ayudar a identificar e incluso cuantificar la exposición individual de radiación, si esta fuera suficientemente elevada como las ocurridas en accidentes. Sin embargo, la presencia de indicadores biológicos de la exposición no implica necesariamente que el individuo conlleve o vaya a experimentar efectos en su salud que pudieran atribuirse a la radiación.

Inferencia y estimación de riesgo de radiación: A pesar de la imposibilidad de atribuir efectos estocásticos, cabe señalar que en virtud de los conocimientos actuales, se puede demostrar que los riesgos (en lugar de efectos) pueden de hecho ser inferidos para situaciones de exposición de radiación, e incluso su valor estimado, aún a dosis pequeñas. Por lo tanto, por razones de deber ético, responsabilidad, prudencia y precaución, es necesario asignar riesgos nominales a la exposición a la radiación, y utilizarlos con fines de protección radiológica (ver más abajo).

EL PARADIGMA DE PROTECCIÓN CONTRA LA RADIACIÓN

El paradigma de la protección radiológica es un modelo para mantener a la gente a salvo de lesiones o daño de radiación, que en este caso podría ser causada por las

operaciones de las centrales nucleares. Se basa en principios fundamentales, que a su vez se basan en sólidas doctrinas éticas. El objetivo principal es lograr un nivel adecuado de protección para las personas y el medio ambiente contra los efectos perjudiciales de la exposición a la radiación sin limitar indebidamente las acciones humanas deseables que pueden estar asociados con dicha exposición; una de estas acciones es la generación de electricidad de origen nuclear. El sistema incluye una clasificación de las situaciones de exposición posible, una caracterización del tipo de exposiciones y un esquema para el control de dichas exposiciones.

Es de señalar que la protección radiológica aplica a todas las exposiciones a las radiaciones de cualquier origen, natural o artificial, e independientemente de su nivel. Sin embargo, la protección solo se puede aplicar a situaciones en las que la fuente de exposición o de las vías que conducen a las dosis recibidas por las personas, puedan ser controladas por algún medio razonable. Algunas situaciones de exposición pueden ser excluidas de la legislación de protección radiológica con el argumento que son imposibles de controlar con instrumentos reguladores (por ejemplo, algunas fuentes de exposición naturales, tales como los rayos cósmicos). Obviamente, este no es el caso de de las centrales nucleares las que están incluidos en la regulaciones sin excepción. Sin embargo, algunas situaciones de exposición a las centrales nucleares pueden quedar exentas de algunos requisitos de protección radiológica, siempre que los controles se consideran injustificadas, por ejemplo, porque la actividad de las fuentes y la exposición que podrían causar son diminutas. Se han alcanzado acuerdos internacionales de valores de exención sobre productos básicos no comestible, para el agua potable y para los productos alimenticios.

Los Principios Básicos

Los principios básicos que forman la base fundamental de un sistema internacional de protección radiológica pueden ser formulados simplísticamente de la siguiente manera:

- Principio de justificación (de las acciones que pueden alterar los niveles de radiación): Cualquier decisión que modifique la situación de exposición a la radiación debe conllevar más bien que mal. Esto significa que mediante la introducción de nuevas fuentes de radiación o la intervención con medidas protectivas para reducir exposiciones existentes (sean estas pre-existentes o causadas por situaciones imprevistas), debe lograrse suficiente beneficio individual o social como para compensar el daño que tales acciones pueden causar. La Figura 42 presenta este principio esquemáticamente.



Figura 42. El principio de la justificación: balance entre el beneficio y el detrimento resultante de una modificación de la situación de exposición a las radiaciones

- Principio de optimización (de la protección radiológica): La probabilidad de incurrir exposiciones a la radiación, el número de personas expuestas, la magnitud de las dosis individuales y de los riesgos esperados, deben mantenerse tan bajo como sea razonablemente obtenible, teniendo en cuenta factores sociales y económicos. Esto significa que el nivel de protección debe ser el mejor en las circunstancias prevalecientes, maximizando el margen de beneficio sobre daño. Una manera de implementar este principio es utilizando la técnica de análisis diferencial

costo-beneficio para lograr el nivel de protección óptimo tal como se ilustra en la Figura 43.

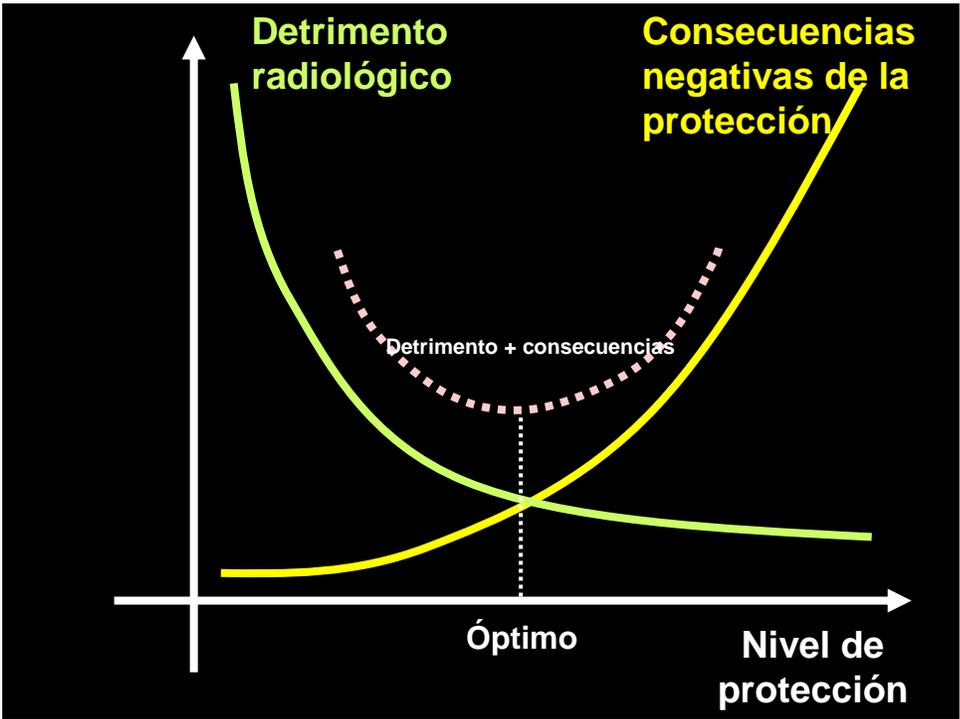


Figura 43. Implementación del principio de optimización mediante la técnica de análisis diferencial costo-beneficio

- Principio de protección individual (de los individuos expuestos): Las dosis incurridas por las personas deben restringirse de manera de impedir posibles inequidades individuales que podrían ocasionar la implementación de los principios de justificación y optimización. Esto significa que se deben aplicar límites a las dosis totales incurridas por los individuos y restricciones a la dosis de los individuos

ocasionadas por una fuente de radiación particular y que cuando estas limitaciones no sean factibles se deben utilizar niveles de referencia que aseguren una restricción adecuada de las dosis individuales. La Figura 44 ilustra las restricciones individuales de dosis recomendadas actualmente para una variedad de situaciones de exposición

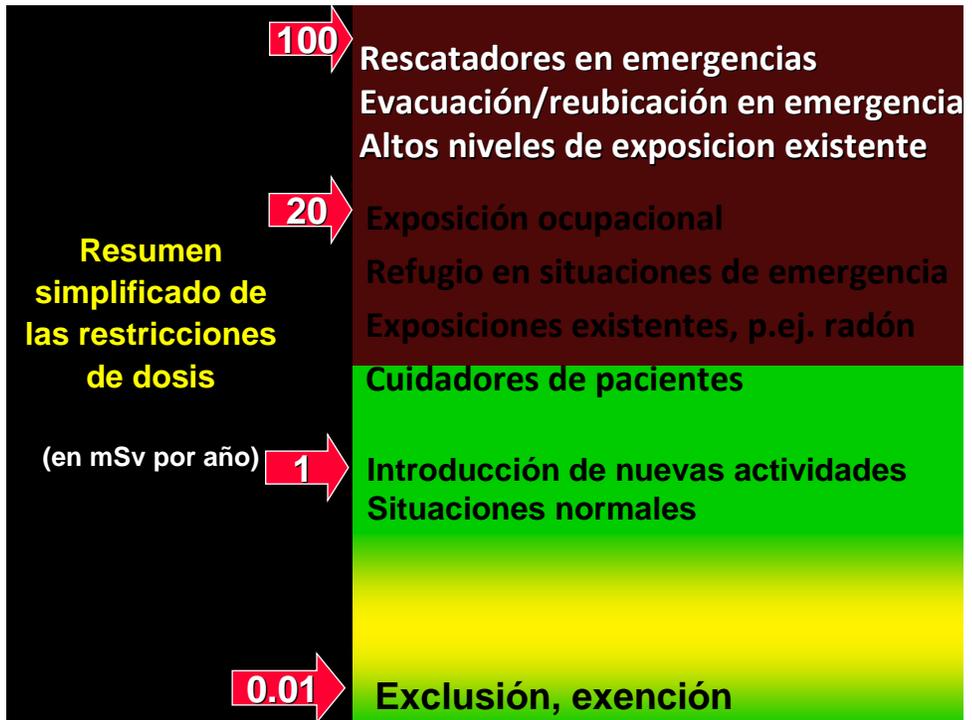


Figura 44. Restricciones individuales de dosis.

Los tres principios fundamentales arriba enunciados integran valores de prudencia que abarcan la protección de las generaciones futuras y de su hábitat. Este otro principio *de facto* se ha formulado de la siguiente manera:

- Principio de prudencia intergeneracional: Los principios de protección radiológica son extensibles a la vida de todos los seres humanos, independientemente de dónde y cuando vivan, significando que todos los seres humanos, presentes y futuros, así como su hábitat, debe ser favorecidos con un nivel de protección que no debe ser más endeble que el nivel previsto para las poblaciones de la sociedad que ha causado las necesidades de protección. Para implantar este principio la protección radiológica no restringe solo la dosis incurrida sin la dosis comprometida a futuro (ver Figura 45).

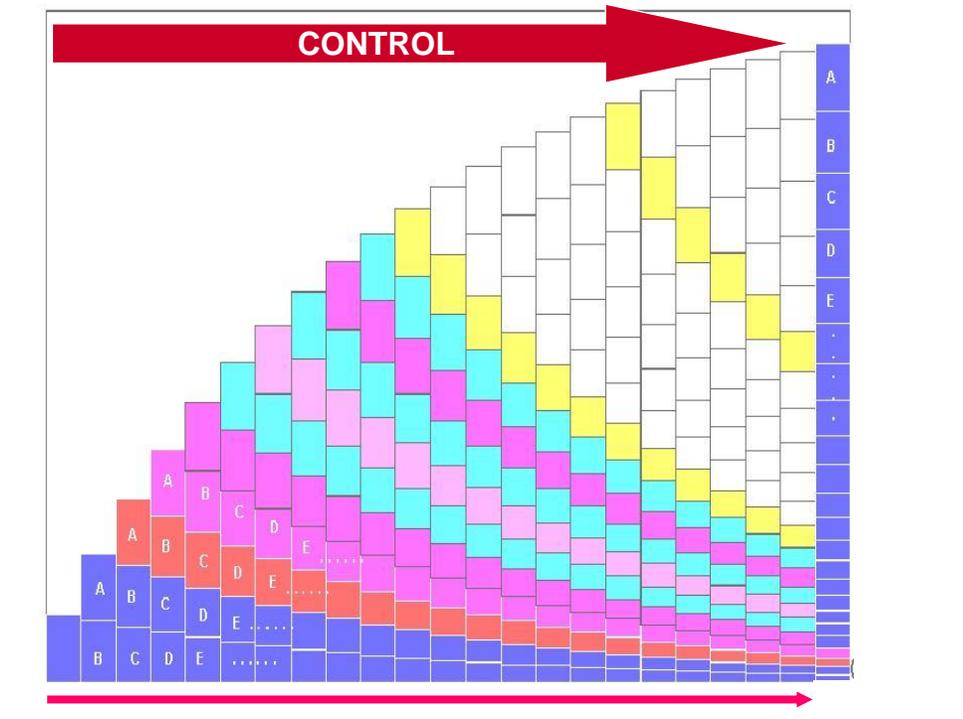


Figura 45. Restricción del compromiso de dosis o dosis legada al futuro: El grafico presenta la dosis A que se incurriría en un

lapso de práctica, así como las dosis legadas para lapsos sucesivos (B, C,...) y muestra como cuando se repiten los lapsos de practica estas dosis se suman para llegar a una dosis legada que es proporcional a la integral de la dosis del primer lapso de práctica. Esa dosis legada final es la que se controla y restringe.

Las Bases Éticas de los Principios

Existe una correlación directa entre los principios básicos de protección radiológica y las doctrinas éticas universales. Esta correlación se puede describir de la siguiente manera:

- El *principio de justificación* se basa en la *ética teleológica* (es decir, la ética consecuencialista), que se expresa simplificadaamente con el aforismo “el fin justifica los medios”;
- El *principio de optimización* se basa en la *ética utilitarista*, que se expresa con el aforismo “hacer el mayor bien para el mayor número de personas”;
- El *principio de limitación* se basa en la *ética deontológica*, que se expresa con el aforismo “no hagas a los demás lo que no quieres que te hagan a ti” (o con el dogma religioso “el mandamiento de Dios se resume en este precepto: cuida de a tu prójimo como a ti mismo”), y,
- El *principio de prudencia intergeneracional* se basa en la *ética aretaica* (es decir, la ética de la virtud), que se expresa con el aforismo que se expresa simplificadaamente con el aforismo “haz el bien que no sea reintegrable”, que es la base del principio de precaución de las Naciones Unidas [UNESCO, 2005].

Las éticas teleológica y utilitarista pertenecen a la familia de éticas de orientación social. Las éticas deontológicas

y aretaica pertenecen a la familia de éticas orientadas hacia los individuos. En relación con la protección, las éticas teleológica y utilitarista tendrían por objeto la protección de la sociedad en su conjunto, mientras que las éticas deontológicas y aretaica estarían más centradas en valores de protección individual.

Los principios de la protección radiológica y sus fundamentos éticos están interrelacionados y TODOS son aplicables a la protección contra la exposición a la radiación. Los principios armonizan todas las doctrinas éticas vigentes y se usan todos ellos en conjunto como se ilustra en la Figura 46.



Figura 46. Interrelación entre los principios de la protección radiológica y las doctrinas de la ética

La estrecha relación entre los principios de la protección y las doctrinas éticas universales prevalecientes ha sido la raíz histórica del suceso del sistema internacional de seguridad nuclear.

Situaciones de Exposición

Los principios de la protección se aplican a todas las situaciones imaginables exposición a la radiación. Estas situaciones han sido caracterizadas como:

- situaciones planeadas,
- situaciones de emergencia, y
- situaciones existentes.

Las situaciones planeadas se refieren a circunstancias relacionadas con la introducción y la operación previsible de fuentes de radiación que puedan exponer a las personas. Las situaciones de emergencia se refieren a circunstancias inesperadas de exposición, tales como condiciones accidentales que puedan ocurrir durante una situación planeada, o a raíz de una acción maliciosa con fuentes de radiación, y que requieran protección urgente. Las situaciones existentes se refieren a circunstancias de exposición a la radiación que ya existen cuando se den tomar decisiones sobre el control de la exposición; por ejemplo, las situaciones de exposición a la radiación natural de fondo.

Se debe destacar que la aplicación de los principios a exposiciones planeadas fue formulada fundamentalmente para la protección contra exposiciones planeadas certeras, es decir, contra exposiciones que se espera se producirán con un alto grado de certeza. Sin embargo, estos principios pueden *mutatis mutandi* ser usados en situaciones de exposiciones

‘potenciales’, es decir, en situaciones donde no existe aun una exposición efectiva pero que tienen la capacidad de convertirse en situaciones de exposición real en el futuro. Es decir, los principios se pueden utilizar no sólo para la ‘protección radiológica’, sino también para lo que suele denominarse ‘seguridad radiológica’ y ‘seguridad nuclear’. Las propuestas de criterios de seguridad fundados en los principios subyacentes de protección radiológica están incorporadas a la normativa Argentina aunque no son universales. La normativa Argentina requiere utilizar las herramientas probabilísticas disponibles, tales como árboles de eventos y fallas, para un análisis a priori de la seguridad de una fuente potencial de radiación. La idea es llevar a cabo una comparación entre la probabilidad de ocurrencia de una cadena hipotética de acontecimientos que conducen a una exposición de las personas, junto con sus consecuencias en términos de dosis efectivas. Así, la autoridad reguladora pertinentes deberían ser capaces de juzgar el nivel de seguridad sobre la base de un enfoque racional basado en principios comunes. Hay que destacar que el uso de un criterio probabilístico de seguridad no está destinado a la confirmación de la seguridad *a posteriori*. Su objetivo es verificar *a priori* que la prevención de accidentes es coherente y consistente con los principios de la protección radiológica.

Categorización de las exposiciones individuales

Las recomendaciones de protección contra las radiaciones distinguen tres categorías de exposiciones:

- exposiciones ocupacionales,
- exposiciones del público, y
- exposiciones médicas.

La exposición ocupacional está definida como toda exposición a radiaciones de los trabajadores ocurrida como resultado de su trabajo. La exposición del público comprende todas las exposiciones que no sean exposiciones ocupacionales ni exposiciones médicas de pacientes. La exposición a la radiación de pacientes ocurre en procedimientos diagnósticos, intervencionistas, y terapéuticos. Las exposiciones relevantes para las centrales nucleares son sólo las exposiciones ocupacionales y públicas.

Cabe señalar que si bien la clasificación de la exposición no reconoce distinciones de género, si una trabajadora ha declarado que ella está embarazada o en lactancia, se deben tener en cuenta controles adicionales para alcanzar un nivel de protección para el embrión / feto muy similar al nivel de los miembros del público.

La Exposición del público es la exposición incurrida por los miembros del público procedente de fuentes de radiación, excepto cualquier exposición ocupacional o médica y la radiación natural local normal.

La exposición médica es la exposición incurrida por los pacientes como parte de su propio diagnóstico o tratamiento médico o dental; por personas, distintas de las ocupacionalmente expuestas, a sabiendas, mientras que ayudan voluntariamente en el apoyo y el confort de los pacientes; y por voluntarios en un programa de investigación biomédica que implique su exposición.

Control de las exposiciones

Los niveles de exposición son controlados a través de *límites de dosis, restricciones de dosis y niveles de referencia* para los

individuos representativos, y sobre todo a través de la plena aplicación del principio de optimización de la protección, a saber:

- El límite de dosis es el valor de la dosis efectiva o la dosis equivalente recibida por individuos que no debe ser excedida a causa de exposiciones planificadas.
- La restricción de dosis es una limitación, anticipada y relacionada a la fuente, en la dosis individual debida a una fuente, la que proporciona un nivel básico de protección para los individuos más expuestos a una fuente, y sirve como límite superior de la dosis en la optimización de la protección para esa fuente. Para las exposiciones ocupacionales, la restricción de dosis es un valor de la dosis individual usado para limitar la gama de opciones consideradas en el curso de la optimización. Para la exposición pública, la restricción de dosis es el límite superior en las dosis anuales que los miembros del público deberían recibir de la operación planificada de cualquier fuente controlada.
- El nivel de referencia se utiliza en emergencias, o en situaciones existentes de exposiciones controlables, y representa el nivel de dosis o de riesgo, por encima del cual se juzga como inapropiado permitir que tengan lugar exposiciones, y por debajo del cual debe implementarse la optimización de la protección. El valor escogido para un nivel de referencia dependerá de las circunstancias inherentes a la exposición en consideración

• La figura 47 muestra los límites de dosis contrastados con las restricciones de dosis y los niveles de referencia para proteger a trabajadores y miembros del público.

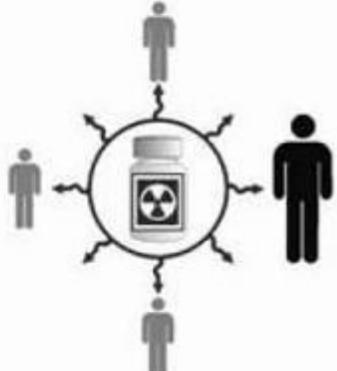
Límites de dosis	Restricciones y niveles de referencia
Proteger al trabajador de la exposición ocupacional y a la Persona representativa de la exposición al público	
	
De todas las fuentes reguladas en situaciones de exposición planificada	De una fuente en todas las situaciones de exposición

Figura 47. Límites de dosis contrastados con las restricciones de dosis y los niveles de referencia para proteger a trabajadores y miembros del público

El cuadro siguiente muestra el uso de las estrictiones de dosis y niveles de referencia en el sistema internacional de protección.

Tipo de situación	Exposición Ocupacional	Exposición del público	Exposición medica
Exposición planificada	Límites de dosis Restricción de dosis	Límites de dosis Restricción de dosis	Niveles de referencia en diagnóstico ^a (Restricción de dosis ^a)
Exposición de emergencia	Niveles de referencia ^a	Niveles de referencia	N.A. ^b
Exposición existente	N.A. ^c	Niveles de referencia	N.A. ^b

^a Las operaciones de recuperación a largo plazo deberían ser tratadas como parte de la exposición ocupacional planificada

^b No aplicable

^c Las exposiciones resultantes de operaciones reparadoras a largo plazo o de empleos discontinuos en las zonas afectadas deberían ser tratadas como parte de la exposición ocupacional planificada aún cuando la fuente de radiación sea "existente"

^d Pacientes

^e Personas que cuidan ó confortan a los pacientes y voluntarios en investigación solamente (ver Aparta-

La tabla siguiente describe el sistema para las restricciones de dosis relacionadas con la fuente y los niveles de referencia, con ejemplos de restricciones para trabajadores y el público debidas a una única fuente dominante para todas las situaciones de exposición que puedan ser controladas:

Bandas de restricciones y Niveles de referencia ^a (mSv)	Características de la situación de exposición	Requerimientos de la protección radiológica	Ejemplos
Mayor de 20 a 100^{b,c}	Los individuos están expuestos por fuentes que no son controlables, o de modo que las acciones para reducir las dosis podrían ser desproporcionadamente disruptivas. Las exposiciones son habitualmente controladas por acción en las vías de exposición	Debería considerarse la reducción de dosis. Deberían hacerse esfuerzos crecientes para reducir las dosis cuando ellas se acercan a los 100 mSv. Los individuos deberían recibir la información sobre los riesgos de la radiación y sobre las acciones para reducir las dosis. Debería asegurarse la evaluación de dosis individuales.	Nivel de referencia establecido para la dosis residual planificada más elevada que pudiese causar una emergencia radiológica
Mayor de 1 a 20	Los individuos habitualmente recibirán el beneficio de la situación de exposición pero no necesariamente de la exposición en sí misma. Las exposiciones pueden controlarse actuando sobre la fuente o, alternativamente, por acción en las vías de exposición.	De ser posible, debería estar disponible información de tipo general que permitiera a los individuos reducir sus dosis. Para situaciones planificadas, debería existir capacitación y vigilancia radiológica individual.	Restricciones establecidas para exposición ocupacional en situaciones planificadas. Restricciones establecidas para personas que cuidan y confortan a pacientes tratados con radiofármacos. Nivel de referencia para buscar protección en una emergencia. Nivel de referencia para radón en viviendas.
1 ó menos	Los individuos se exponen a una fuente que les proporciona poco o ningún beneficio individual pero sí beneficios a la sociedad en general. Las exposiciones son habitualmente controladas por acción directa sobre la fuente para la cual los requisitos de protección radiológica pueden planificarse por adelantado	Debería estar disponible la información general sobre el nivel de exposición. Deberían hacerse controles periódicos de niveles de exposición en las vías de exposición	Restricciones fijadas para la exposición del público en situaciones planificadas.

^a Una dosis aguda o anual.

^b En situaciones excepcionales, los trabajadores voluntarios informados pueden recibir dosis por encima de esta banda para salvar vidas, prevenir efectos severos a la salud inducidos por la radiación, o prevenir el desarrollo de condiciones catastróficas.

^c Situaciones en las cuales el umbral de dosis para efectos deterministas en órganos o tejidos relevantes podría ser excedido siempre deberían requerir una acción

La tabla siguiente presenta lo límites de dosis recomendados en situaciones de exposición planificadas:

Tipo de límite	Ocupacional	Público
Dosis efectiva	20 mSv por año promediada en periodos definidos de 5 años ^e	1 mSv en un año ^f
Dosis equivalente anual en:		
Cristalino ^b	150 mSv	15 mSv
Piel ^{c,d}	500 mSv	50 mSv
Manos y pies	500 mSv	---

^a Los límites de dosis efectivas son para la suma de las dosis efectivas de relevancia procedentes de exposiciones externas en el periodo de tiempo especificado y la dosis efectiva comprometida de la incorporación de radionucleidos en el mismo periodo. Para adultos, la dosis efectiva comprometida se calcula para un periodo de 50 años tras la incorporación, mientras que para niños se calcula para el periodo de hasta 70 años de edad.

^b Este límite está actualmente siendo revisado por un Grupo de Trabajo de la ICRP.

^c La limitación de dosis efectiva proporciona una protección suficiente para la piel frente a efectos estocásticos.

^d Promediado en un área de 1 cm² de piel, independientemente del área expuesta.

^e Con la condición adicional de que la dosis efectiva no debe exceder los 50 mSv en ninguno de los años individuales. En el caso de la exposición ocupacional de mujeres embarazadas se aplican restricciones adicionales.

^f En circunstancias especiales, se puede permitir un nivel superior de dosis efectiva en un único año, a condición de que la media durante 5 años no exceda 1 mSv por año.

Es importante destacar que los límites al cristalino se acaban de reducir a 20 mSv por año.

Protección del Medio Ambiente

Los enfoques actuales de protección contra las radiaciones reconocen la importancia de proteger no sólo los humanos sino también el medio ambiente. Actualmente se reconoce la importancia de proteger al medio ambiente cuando, previamente, la preocupación sobre el medio ambiente sólo se centraba en cuanto a la migración de radionucleidos,

principalmente en el contexto de las situaciones de exposición planificada.

En tales situaciones planificadas, las normas de control medioambiental necesarias para proteger al público en general asegurarían que no se ponen a las otras especies en riesgo. Para proveer un marco sólido para la protección del medio ambiente en todas las situaciones de exposición, actualmente se propone el uso de Animales y Plantas de Referencia. Para establecer una base de aceptabilidad, las dosis adicionales calculadas a éstos organismos de referencia podrían compararse con dosis conocidas que tienen efectos biológicos específicos y con las tasas de dosis normalmente experimentadas en el medio ambiente natural. Sin embargo, no propone imponer forma alguna de “límites de dosis” para la protección del medio ambiente.

Hay que reconocer que hasta hace poco la palabra medio ambiente en sí estuvo ausente del lenguaje normal y la preocupación por la protección del medio ambiente es un fenómeno relativamente nuevo. La palabra, se deriva del término francés para 'entorno', y en sentido estricto se refiere al entorno de un objeto. Últimamente ha evolucionado en el sentido de los alrededores o condiciones en las que una persona, animal o planta vive o trabaja y, más recientemente, se equipara con el mundo natural, especialmente afectado por la actividad humana. Sin duda, tomará tiempo para desarrollar doctrinas de protección integral de dicho concepto relativamente moderno. En los últimos años, se están construyendo dos enfoques fundamentales de la protección del medio ambiente: el biocentrismo y el ecocentrismo. Existe un aparente vacío de una ética del medio ambiente, pero se están desarrollando algunos principios básicos para proteger no sólo

los humanos sino también el medio ambiente en sí de los efectos perjudiciales de la exposición a la radiación, con el fin de garantizar que el desarrollo y aplicación de enfoques protección del medio ambiente son compatibles con los de la protección radiológica del hombre, y con las de protección del medio ambiente de otros peligros potenciales.

Como se ha indicado, en el contexto de situaciones de exposición planificadas, las normas de control ambiental necesarias para proteger al público en general deberían asegurar que otras especies en el hábitat humano no se encuentran en situación de riesgo. Sin embargo, la situación podría ser diferente en situaciones de emergencia y situaciones existentes y en el medio ambiente en general. Por lo tanto, la comunidad de la protección radiológica se ha adherido a algunos objetivos básicos de protección internacional del medio ambiente, a saber:

- (i) mantener la diversidad biológica,
- (ii) asegurar la conservación de las especies, y
- (iii) para proteger la salud y el estado de los hábitats, comunidades y ecosistemas naturales.

Bajo estas premisas, se ha recomendado un marco internacional para evaluar el impacto de las radiaciones ionizantes en las especies no-humanas y las técnicas para su aplicación. En última instancia, la protección del medio ambiente de exposición a la radiación se logrará a través de los esfuerzos internacionales para limitar los vertidos de sustancias radiactivas.

NORMATIVA INTERNACIONAL

La base epistemológica proporcionada por el UNSCEAR y el paradigma de la protección contra la radiación recomendado por

la ICRP se utilizan como la base del régimen internacional de seguridad que se está construyendo bajo la égida del OIEA, el que cubre todas las prácticas que hacen uso de materiales radioactivos y radiación. El albor de la centuria ha sido testigo del surgimiento de facto de lo que podría denominarse un *régimen internacional de seguridad y radiológica*. Puede interpretarse que este régimen incluye tres elementos esenciales:

- compromisos internacionales jurídicamente vinculantes entre los Estados, que generalmente se manifiestan como convenciones;
- normas internacionales de seguridad universalmente acordadas; y
- disposiciones que facilitan la aplicación de esas normas.

Si bien la seguridad radiológica es una responsabilidad de los Estados, durante mucho tiempo los gobiernos se han interesado en formular enfoques armonizados. Un mecanismo esencial para el logro de la armonización ha sido el establecimiento de normas de seguridad acordadas a nivel internacional y la promoción de su aplicación en todo el mundo. La elaboración de estas normas es una función prevista en el Estatuto del OIEA, que es única dentro del sistema de las Naciones Unidas. El Organismo está facultado expresamente por ese Estatuto "a establecer normas de seguridad" y "a proveer a la aplicación de estas normas.

Convenciones Internacionales

Durante los últimos años, las convenciones internacionales jurídicamente vinculantes han llegado a desempeñar un papel decisivo en el mejoramiento de la seguridad nuclear, radiológica

y de los desechos. El OIEA apoya este proceso facilitando la concertación de acuerdos entre las Partes (Estados contratantes) y llevando a cabo una serie de funciones una vez que estas pactan los compromisos. Entre estas funciones se encuentran la de actuar de Secretaría en las reuniones de las Partes Contratantes, mantener los registros de los puntos de contacto nacionales, y prestar servicios a solicitud de los Estados partes. Bajo los auspicios del OIEA, se han adoptado en los últimos años cuatro convenciones internacionales sobre seguridad, a saber:

- la Convención sobre la pronta notificación de accidentes nucleares ;
- la Convención sobre asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica;
- la Convención sobre Seguridad Nuclear, y
- la Convención conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos (la llamada "Convención conjunta").

Otra convención de relevancia es la Convención número 115 de la Organización Internacional del Trabajo. Esta convención se aplica a todas las actividades en las que los trabajadores estén expuestos a radiaciones ionizantes en el curso de su trabajo.

Las normas (o estándares) internacionales

De conformidad con su Estatuto, el OIEA ha establecido un cuerpo de normas en los ámbitos de la seguridad radiológica, la seguridad del transporte de materiales radiactivos, la seguridad de los desechos radiactivos, y la seguridad de las instalaciones nucleares.

El OIEA está autorizado por su Estatuto a “establecer o adoptar, normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el peligro para la vida y la propiedad” — normas que el OIEA debe utilizar en sus propias operaciones, y que los Estados pueden aplicar mediante sus disposiciones de reglamentación de la seguridad nuclear y radiológica. A esos efectos, el OIEA consulta con los órganos competentes de las Naciones Unidas y con los organismos especializados pertinentes. Un amplio conjunto de normas de alta calidad revisadas periódicamente, es un elemento clave de un régimen de seguridad mundial estable y sostenible, como también lo es la asistencia del OIEA en la aplicación de esas normas.

El OIEA inició su programa de normas de seguridad en 1958. El énfasis puesto en su calidad, idoneidad y mejora continua ha redundado en el uso generalizado de las normas del OIEA en todo el mundo. La Colección de Normas de Seguridad incluye ahora Principios fundamentales de seguridad unificados, que representan un consenso internacional acerca de lo que debe constituir un alto grado de protección y seguridad. Con el firme apoyo de la Comisión sobre Normas de Seguridad, el OIEA se esfuerza por promover la aceptación y el uso a escala mundial de sus normas. Las normas solo son eficaces si se aplican adecuadamente en la práctica. Los servicios de seguridad del OIEA abarcan el diseño, la selección de emplazamientos y la seguridad técnica, la seguridad operacional, la seguridad radiológica, la seguridad en el transporte de materiales radiactivos y la seguridad en la gestión de los desechos radiactivos, así como la organización a nivel gubernamental, las cuestiones relacionadas con reglamentación y la cultura de la seguridad en las organizaciones. Estos servicios de seguridad prestan asistencia a los Estados Miembros en la aplicación de las normas y

posibilitan el intercambio de experiencias y conocimientos valiosos.

La reglamentación de la seguridad es una responsabilidad nacional, y muchos Estados han decidido adoptar las normas del OIEA para incorporarlas en sus reglamentos nacionales. Para las partes en las diversas convenciones internacionales sobre seguridad, las normas del OIEA son un medio coherente y fiable de asegurar el cumplimiento eficaz de las obligaciones emanadas de esas convenciones. Los órganos reguladores y los explotadores de todo el mundo también aplican las normas para mejorar la seguridad en la generación de energía nucleoelectrica y en los usos de la energía nuclear en la medicina, la industria, la agricultura y la investigación.

La seguridad no es un fin en sí misma, sino un requisito indispensable para la protección de las personas en todos los Estados y del medio ambiente, en la actualidad y en el futuro. Los riesgos relacionados con la radiación ionizante deben evaluarse y controlarse sin restringir indebidamente la contribución de la energía nuclear al desarrollo equitativo y sostenible. Los Gobiernos, órganos reguladores y explotadores de todo el mundo deben velar por que los materiales nucleares y las fuentes de radiación se utilicen con fines benéficos y de manera segura y ética. Las normas de seguridad del OIEA están concebidas para facilitar esa tarea, y aliento a todos los Estados Miembros a hacer uso de ellas

Las normas del OIEA siguen un patrón jerárquico, como sigue:

- ***Principios fundamentales de seguridad***, que establecen los objetivos básicos, los conceptos y principios de seguridad;
- ***Requisitos de seguridad***, que indican los requisitos básicos que deben cumplirse en el caso de determinadas actividades o aplicaciones, y
- ***Guías de seguridad***, que contienen recomendaciones relacionadas con el cumplimiento de los requisitos.

Los principios fundamentales de seguridad y los requisitos de seguridad exigen la aprobación de los delegados de los gobiernos a la Junta de Gobernadores del OIEA. Las guías se publican bajo la autoridad del Director General del OIEA. Existen además otras series de documentos de apoyo, informes de seguridad, que proveen de ejemplos y descripciones detalladas de los métodos que se pueden emplear en la aplicación de las Normas.

Principios Fundamentales de Seguridad

Los principios fundamentales de seguridad cuentan con el patrocinio conjunto de la Comunidad Europea de la Energía Atómica (Euratom), la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la Organización Marítima Internacional (OMI), la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (AEN/OCDE), la Organización Panamericana de la Salud (OPS), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Mundial de la Salud

(OMS), (las organizaciones patrocinadoras), es decir se trata de un consenso de todo el sistema de Naciones bajo las égida de las organizaciones especializadas de las Naciones Unidas. El respeto de los Principios fundamentales de seguridad debería facilitar la aplicación de las normas internacionales de seguridad y contribuir a lograr una mayor coherencia entre las disposiciones de los distintos Estados. Por consiguiente, conviene que todos los Estados respeten y promuevan esos principios. Estos principios son vinculantes para el OIEA en relación con sus actividades y para los Estados en relación con las actividades para las que el OIEA les preste asistencia. En el ejercicio de sus facultades discrecionales los Estados o las organizaciones patrocinadoras pueden adoptar los principios, para aplicarlos a sus propias actividades.

Los principios fundamentales de seguridad establecen que el objetivo fundamental de la seguridad es proteger a las personas y el medio ambiente contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. El objetivo fundamental de la seguridad se aplica a todas las instalaciones y actividades y a todas las etapas del ciclo de vida de una instalación o fuente de radiación, a saber, la planificación, la selección del emplazamiento, el diseño, la fabricación, la construcción, la puesta en servicio y la explotación, así como la clausura y el cierre. Ello comprende las actividades conexas de transporte de material radiactivo y gestión de los desechos radiactivos. Con miras al cumplimiento de estos objetivos, se han formulado diez principios de seguridad, que constituyen la base para elaborar los requisitos y aplicar las medidas de seguridad con el fin de alcanzar el objetivo fundamental de la seguridad. Los principios de seguridad forman un conjunto que se aplica en su totalidad; aunque en la práctica diferentes principios pueden revestir mayor o menor importancia según las circunstancias, es

indispensable la aplicación adecuada de todos los principios pertinentes.

Los principios de seguridad del régimen internacional son los siguientes:

- Principio 1–**Responsabilidad de la seguridad**: La responsabilidad primordial de la seguridad debe recaer en la persona u organización a cargo de las instalaciones y actividades que generan riesgos asociados a las radiaciones.
- Principio 2–**Función del gobierno**: Debe establecerse y mantenerse un marco jurídico y gubernamental de seguridad que sea eficaz, y que incluya un órgano regulador independiente.
- Principio 3–**Liderazgo y gestión en pro de la seguridad**: Deben establecerse y mantenerse un liderazgo y una gestión que promuevan eficazmente la seguridad en las organizaciones que se ocupan de los riesgos asociados a las radiaciones, y en las instalaciones y actividades que los generan.
- Principio 4–**Justificación de las instalaciones y actividades**: Las instalaciones y actividades que generan riesgos asociados a las radiaciones deben reportar un beneficio general.
- Principio 5–**Optimización de la protección**: La protección debe optimizarse para proporcionar el nivel de seguridad más alto que sea razonablemente posible alcanzar.
- Principio 6–**Limitación de los riesgos para las personas**: Las medidas de control de los riesgos asociados a las radiaciones deben garantizar que ninguna persona se vea expuesta a un riesgo de daños inaceptable.
- Principio 7–**Protección de las generaciones presentes y futuras**: Deben protegerse contra los riesgos asociados a las radiaciones las personas y el medio ambiente del presente y del futuro.

- Principio 8–**Prevención de accidentes**: Deben desplegarse todos los esfuerzos posibles para prevenir los accidentes nucleares o radiológicos y para mitigar sus consecuencias.
- Principio 9–**Preparación y respuesta en casos de emergencia**: Deben adoptarse disposiciones de preparación y respuesta para casos de incidentes nucleares o radiológicos.
- Principio 10–**Medidas protectoras para reducir los riesgos asociados a las radiaciones existentes o no reglamentados**: Las medidas protectoras para reducir los riesgos asociados a las radiaciones existentes o no reglamentados deben justificarse y optimizarse.

Requisitos de Seguridad

Los Requisitos de seguridad abarcan los requisitos básicos que deben cumplirse para garantizar la seguridad de determinadas actividades o áreas de aplicación. Estos requisitos se rigen por los objetivos básicos, los conceptos y principios presentados en los *Principios fundamentales de seguridad*. Las publicaciones en esta categoría no presentan recomendaciones sobre, o explicaciones de, cómo cumplir con los requisitos. El estilo de escritura utilizado se expresa con el verbo "deberá".

Guías de Seguridad

Las Guías de seguridad abarcan recomendaciones, basadas en la experiencia internacional, de medidas para garantizar la observancia de los requisitos de seguridad. Recomendaciones de las Guías de seguridad se expresan con declaraciones que utilizan el verbo "debería" y se publican bajo la autoridad del Director General. El OIEA ha publicado un gran número de

guías de seguridad en apoyo al régimen internacional de seguridad.

Las Normas (Requisitos) Internacionales de Protección Radiológica.

En su sesión del 12 de septiembre de 2011, la Junta de Gobernadores del OIEA estableció nuevas normas básicas de seguridad (BSS en inglés o NBS en castellano). Los principios fundamentales y límites numéricos de las NBS son absolutamente coherentes y consistentes con las recomendaciones de la ICRP descritas anteriormente. Estas normas básicas tienen una larga historia, a saber

- La Junta de Gobernadores del OIEA aprobó las primeras normas básicas de seguridad en junio de 1962 y el OIEA las publicó como Vol. N° 9 de la Colección Seguridad.
- En 1967 apareció una versión revisada.
- El OIEA publicó una tercera revisión como Vol. N° 9 de la Colección Seguridad, Edición de 1982; esta edición fue patrocinada conjuntamente por la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE (AEN/OCDE), el OIEA, la Organización Internacional del Trabajo (OIT) y la Organización Mundial de la Salud (OMS).
- La siguiente versión fueron las Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación, publicadas por el OIEA en febrero de 1997 como Vol. N° 115 de la Colección Seguridad, y patrocinadas conjuntamente por la AEN/OCDE, el OIEA, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la OIT, la OMS y la Organización Panamericana de la Salud (OPS).
- En septiembre de 2005, la Conferencia General del OIEA, en su resolución GC(49)/RES/9, pidió a la Secretaría del OIEA que iniciara un examen de las NBS.

El OIEA invitó a representantes de las Naciones Unidas y de otras organizaciones intergubernamentales a participar en el examen y la revisión de las NBS mediante la creación de una Secretaría de las NBS integrada por representantes designados de las organizaciones patrocinadoras potenciales, a saber: la AEN/OCDE, la Comisión Europea (CE/Euratom), la FAO, la OIT, la OMS, la OPS y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

- En septiembre de 2006, la Conferencia General del OIEA, en su resolución GC(50)/RES/10, tomó nota del examen de las NBS y señaló que la revisión estaría coordinada por la Secretaría de las NBS.
- La revisión de las NBS comenzó a principios de 2007 con una serie de reuniones de redacción por esferas temáticas, acogidas por la AEN/OCDE, el OIEA, la OIT, la OMS y la OPS. El proyecto de texto elaborado en estas reuniones fue la base de los debates de una reunión técnica celebrada en julio de 2007, en la que participaron representantes de las organizaciones patrocinadoras potenciales. En el proyecto de texto se tuvieron en cuenta las conclusiones del UNSCEAR y las recomendaciones de la ICRP. La reunión técnica recomendó que la versión revisada de las NBS se estructurara en “situaciones de exposición planificadas”, “situaciones de exposición de emergencia” y “situaciones de exposición existentes”, y que cada una de las principales secciones del texto presentaran el mismo formato y abarcaran la exposición ocupacional, la exposición del público y (solo para las situaciones de exposición planificadas) la exposición médica, de acuerdo con las recomendaciones de la ICRP. También se recomendó la inclusión de una sección principal dedicada a los requisitos genéricos aplicables en todas las situaciones de exposición. La reunión técnica recomendó igualmente que las NBS revisadas abarcaran la

protección del medio ambiente, en consonancia con los Principios fundamentales de seguridad.

- Desde finales de 2007 a 2009 se celebraron nuevas reuniones de redacción y examen con las organizaciones patrocinadoras potenciales. Los comités de normas de seguridad del OIEA y grupos de expertos de las organizaciones patrocinadoras potenciales formularon observaciones sobre los proyectos de NBS revisadas en 2008 y 2009.
- En diciembre de 2009 se celebró otra reunión técnica, en la que participaron representantes de las organizaciones patrocinadoras potenciales, con el fin de examinar una declaración sobre el radón publicada por la ICRP en noviembre de 2009 y evaluar su repercusión en las NBS revisadas. La reunión técnica también formuló recomendaciones sobre el texto de las NBS revisadas en relación con la exposición debida al radón doméstico y la exposición ocupacional debida al radón.
- En enero de 2010, el proyecto de texto fue presentado a los Estados Miembros del OIEA para que formularan observaciones. A la luz de las observaciones recibidas, se elaboró un proyecto de texto revisado.
- El proyecto de texto revisado fue aprobado posteriormente por el Comité sobre Normas de Seguridad Nuclear y el Comité sobre Normas de Seguridad en el Transporte en noviembre de 2010, y por el Comité sobre Normas de Seguridad Radiológica y el Comité sobre Normas de Seguridad de los Desechos en diciembre de 2010, y fue refrendado por la Comisión sobre Normas de Seguridad (CSS) en mayo de 2011.
- El 21 de abril de 2011, la ICRP emitió una Declaración acerca de las reacciones en los tejidos, en la que recomendó una reducción del límite de dosis (expresada como dosis equivalente) aplicable al cristalino.
- En mayo de 2011, la CSS concluyó que tiene previsto incorporar el límite de dosis revisado aplicable al cristalino en el apéndice III de las NBS revisadas, previa

consulta con los Estados Miembros. Se invitó a los Estados Miembros a formular observaciones hasta el 7 de julio de 2011 sobre el apéndice III revisado.

- Finalmente, atendiendo a una recomendación de los presidentes saliente y entrante del Comité sobre Normas de Seguridad Radiológica, el Presidente de la CSS aprobó el 12 de julio de 2011 el apéndice III revisado.

El objetivo de las nuevas normas básicas es establecer, sobre la base del objetivo y los principios de seguridad estipulados en los Principios fundamentales de seguridad, los requisitos para la protección de las personas y el medio ambiente contra los efectos nocivos de la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación.

Las normas básicas están destinada a autoridades gubernamentales como los órganos reguladores encargados de la concesión de licencias a instalaciones y actividades; a organizaciones explotadoras de instalaciones nucleares, algunas instalaciones de extracción y de tratamiento de materias primas como las minas de uranio, instalaciones de gestión de desechos radiactivos, y cualquier otra instalación o instalaciones donde se produzcan o utilicen fuentes de radiación con fines industriales, de investigación o médicos; a organizaciones encargadas del transporte de materiales radiactivos; a organizaciones encargadas de la clausura de instalaciones; y al personal y las organizaciones de apoyo técnico y científico que prestan asistencia a las organizaciones y autoridades antes mencionadas.

EL ACCIDETE DE FUKUSHIMA DAIICHI

Cuando la protección radiológica se aproximaba a su cumpleaños centenario (el que generalmente se asocia a la

fundación de la ICRP) se le presentó unos de sus mayorías desafíos: el accidente en la Central Nuclear de Fukushima Daiichi en Japón. Todavía no se han resuelto todos los problemas de protección radiológica asociados a las secuelas de ese accidente. Es por eso que el autor consideró apropiado epilogar esta memoria con una descripción de las consecuencias radiológicas de ese accidente mayor y de algunas de las lecciones aprendidas del mismo.

El 11 de marzo de 2011 ocurrió un gran terremoto en el Japón oriental. Fue causado por una liberación súbita de energía en la superficie de contacto de la placa tectónica del Pacífico con la placa tectónica Norteamericana, bajo la cual se sumerge. Una sección de la corteza terrestre, de unos 500 km de longitud y 200 km de ancho, según las estimaciones, se fracturó y provocó un terremoto masivo de magnitud 9,0 y un tsunami que afectó a una amplia zona costera del Japón, incluida la costa nororiental, donde varias olas superaron los 10 metros de altura. El terremoto y el tsunami causaron muchas muertes y gran devastación en el Japón. Más de 15 000 personas perdieron la vida, más de 6000 quedaron heridas. Los edificios y la infraestructura sufrieron daños considerables, particularmente a lo largo de la costa nororiental del Japón.

La central nuclear de Fukushima Daiichi, constituida por seis reactores nucleares y explotada por la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio (TEPCO), se encuentra ubicada en la costa oriental del Japón cercana al epicentro del terremoto en las honduras del Océano Pacífico. De las seis unidades de la central nuclear de Fukushima Daiichi, la 1, la 2 y la 3 estaban funcionando en el momento del accidente; las Unidades 4, 5 y 6 estaban en una parada programada.

El terremoto causó daños al tendido del suministro eléctrico exterior y el tsunami provocó una destrucción sustancial de la infraestructura operacional y de seguridad del emplazamiento. El efecto combinado fue la pérdida de la alimentación eléctrica dentro y fuera del emplazamiento. Ello privó de la función de refrigeración a los tres reactores que estaban en funcionamiento, así como a las piscinas de combustible gastado. Otras cuatro centrales nucleares situadas a lo largo de la costa también se vieron afectadas por el terremoto y el tsunami en diferentes grados. Sin embargo, todos los reactores que estaban en funcionamiento en esas centrales pararon de forma segura.

Pese a los esfuerzos de los operadores de la central nuclear de Fukushima Daiichi por mantener el control, los núcleos de los reactores de las Unidades 1 a 3 se sobrecalentaron, el combustible nuclear se fundió y las tres vasijas de contención se fracturaron. El hidrógeno que escapó de las vasijas a presión de los reactores provocó explosiones en los edificios de los reactores de las Unidades 1, 3 y 4, causando daños a las estructuras y el equipo y lesiones al personal. La central dejó escapar radionucleidos a la atmósfera, que se depositaron en la tierra y el océano. También hubo emisiones directas al mar.

Los habitantes de 20 km a la redonda y de otras zonas designadas fueron evacuados, y los que se encontraban en un radio de entre 20 y 30 km recibieron primero la instrucción de permanecer en espacios interiores, y más tarde el consejo de evacuar la zona voluntariamente. Se impusieron restricciones a la distribución y el consumo de alimentos y al consumo de agua potable. Muchas personas aún no han regresado a las zonas de las que habían sido evacuadas.

Una vez estabilizadas las condiciones de los reactores de la central, se iniciaron los trabajos para preparar su clausura. Los esfuerzos para la recuperación de las zonas afectadas por el accidente, incluida la restauración y revitalización de las comunidades y la infraestructura, comenzaron en 2011.

El 16 de diciembre de 2011, la oficina de respuesta integrada del Gobierno de Japón y TEPCO anunció que en las Unidades 1 a 3 se habían alcanzado las condiciones del ‘estado de parada fría’. La expresión ‘estado de parada fría’ fue definida de una manera que difiere de la terminología empleada por el OIEA y por otros.

Sin duda además de las catástrofes naturales que dieron lugar a este accidente hubieron serias deficiencias en Japón que conllevaron a este accidente. Las deficiencias de Fukushima Daiichi podrían ser esencialmente resumidas como sigue:

1. Haber subestimado el potencial de acontecimientos externos que podrían afectar la seguridad de las plantas, en particular: (i) la ubicación de la planta a nivel del mar en una zona conocida por ser propensa a los tsunamis, y (ii) la vulnerabilidad de la red eléctrica a los terremotos.

2. Previsiones insuficientes para poder para mantener la esencial refrigeración, instrumentación, alumbrado y las comunicaciones en cualquier situación de emergencia particular y, en particular, para asegurar un suministro fiable de electricidad a los sistemas de refrigeración de emergencia.

3. Contención inadecuada para actuar como un último recurso después de imprevisibles eventos catastróficos, a fin de evitar la liberación de cantidades sustanciales de material

radiactivo en el medio ambiente y en particular, la falta de protección frente a riesgos de explosión de hidrógeno.

4. Inseguro almacenamiento de combustible gastado, incluyendo el suministro inmediato de agua para permitir un enfriamiento continuo (un problema serio para el combustible de uranio enriquecido, pero no así para el combustible de uranio natural).

5. Falta de preparación para la gestión de accidentes de múltiples eventos y de situaciones accidentales prolongadas, así como de respuesta a emergencias.

6. Control reglamentario insuficiente.

Es un imperativo ético que la comunidad nuclear internacional se centren en la resolución universal de estos temas. Los reactores nucleares en todo el mundo que no cumplan con un conjunto mínimo de requisitos en las cuestiones antes mencionadas, por ejemplo, tener una contención adecuada, deberían ser considerados peligrosos de forma inequívoca.

Radiactividad en el medio ambiente

El accidente dio lugar a la emisión de radionucleidos al medio ambiente. Muchas organizaciones hicieron evaluaciones de las emisiones empleando diferentes modelos. La mayor parte de las emisiones a la atmósfera fueron transportadas hacia el este por los vientos dominantes, depositándose en el océano Pacífico Norte y dispersándose dentro de él. Las incertidumbres en las estimaciones de la cantidad y la composición de las sustancias radiactivas fueron difíciles de resolver, entre otras

cosas por la falta de datos de monitorización de la deposición de las emisiones atmosféricas en el océano.

En la primera fase del accidente, los gases nobles ^{85}Kr y ^{133}Xe , con períodos de semidesintegración de 10,76 años y 5,25 días, respectivamente, contribuyeron a la exposición externa causada por el penacho de las emisiones atmosféricas. El ^{131}I , que es de corta duración, con un período de semidesintegración de 8,02 días, contribuyó a las dosis equivalentes recibidas en la glándula tiroides, cuando hubo ingestión o inhalación. El ^{134}Cs y el ^{137}Cs , que duran más tiempo, con períodos de semidesintegración de 2,06 años y 30,17 años, respectivamente, contribuyeron a las dosis equivalentes y efectivas a través de la exposición interna y externa. Aunque el ^{131}I decae con relativa rapidez, puede dar lugar a dosis equivalentes relativamente altas en la glándula tiroides. En algunas zonas, el ^{137}Cs puede permanecer en el medio ambiente y, en ausencia de medidas de restauración, podría seguir contribuyendo a las dosis efectivas recibidas por las personas.

Los gases nobles constituyeron una parte importante de las primeras emisiones de la central nuclear de Fukushima Daiichi; se estima que se descargaron entre 6,4 y 32,6 PBq de ^{85}Kr , y entre 400 y 11 000 PBq de ^{133}Xe aproximadamente (casi la totalidad de las cantidades presentes). La actividad total media del ^{131}I emitido fue de unos 140 a 200 PBq, y la del ^{137}Cs , de alrededor de 12 a 16 PBq. Se estima que las emisiones producidas por el accidente equivalieron aproximadamente a una décima parte de las generadas por el accidente de la central nuclear de Chernóbil en 1986 [174, 183, 184]. La mayor parte de las emisiones se dispersaron por el océano Pacífico Norte; como resultado de ello, la cantidad y la composición isotópica del material emitido (el término fuente)

no se pudieron reconfirmar con mediciones medioambientales de los depósitos de radionucleidos. La Figura presenta la distribución atmosférica temporal de cesio en el hemisferio norte.

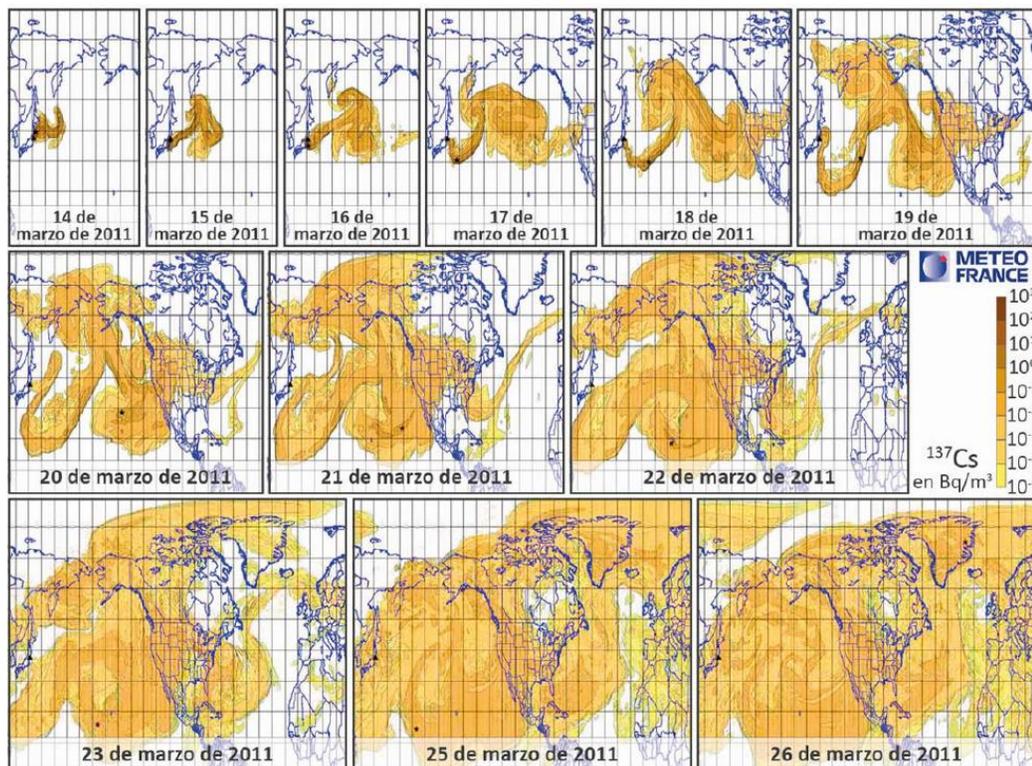


Figura 48. Distribución atmosférica temporal de ^{137}Cs en el hemisferio norte

Los cambios en la dirección del viento hicieron que una parte relativamente pequeña de las emisiones atmosféricas se depositara en la tierra, principalmente hacia el noroeste de la central nuclear de Fukushima Daiichi produciendo una ‘contaminación’ de los territorios que genera un aumento de la

dosis de radiación natural, cuya evolución temporal se presenta en la Figura 49. La actividad medida de los radionucleidos se reduce con el paso del tiempo debido a los procesos de desintegración física y transporte medioambiental, así como a las actividades de limpieza.

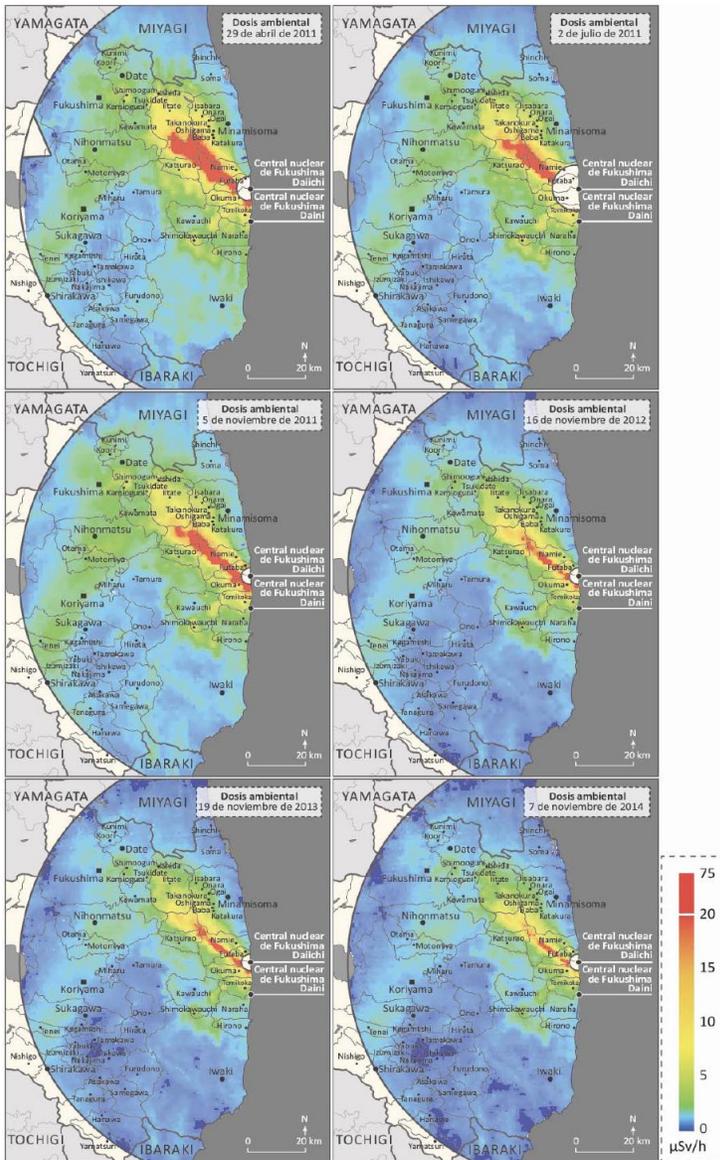


Figura 49. Tasa de dosis equivalente ambiental medida desde el aire (en $\mu\text{Sv/h}$) resultante de los depósitos de las emisiones que se dispersaron por las zonas situadas al noroeste de la central.

Además de los radionucleidos que entraron en el océano por deposición atmosférica, hubo emisiones líquidas y descargas desde la central nuclear de Fukushima Daiichi directamente al mar frente al emplazamiento. El desplazamiento preciso de los radionucleidos en el océano es difícil de determinar solo con mediciones, pero se han utilizado varios modelos de transporte oceánico para estimar la dispersión oceánica. La Figura 50 presenta la distribución oceánica de cesio 137 modelada temporalmente.

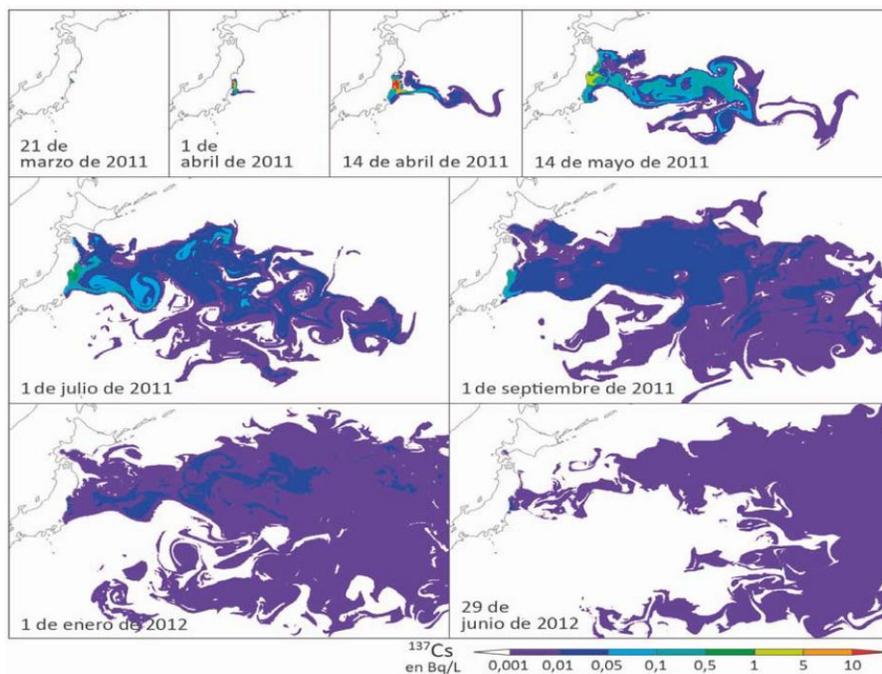


Figura 50. Se utilizaron diversos modelos oceánicos para estimar la concentración de actividad del ^{137}Cs en el agua del mar. La figura presenta un ejemplo de una modelización de las aguas contaminadas entre el 21 de marzo de 2011 y el 29 de junio de 2012 (el código de colores y las unidades utilizadas son las que se emplearon en las referencia original).

Algunos radionucleidos emitidos, como el yodo 131, el cesio 134 y el cesio 137, fueron encontrados en el agua potable, en alimentos y en algunos productos no comestibles. En respuesta al accidente, las autoridades japonesas establecieron restricciones para evitar el consumo de estos productos.

Se ha reiterado que en caso de emisión accidental de sustancias radiactivas al medio ambiente, es preciso cuantificar y caracterizar sin demora la cantidad y composición de la emisión. Cuando se trata de emisiones importantes, se requiere un programa amplio y coordinado de monitorización ambiental a largo plazo para determinar la naturaleza y el alcance de los efectos radiológicos en el medio ambiente a nivel local, regional y mundial. Estas lecciones obvias no fueron seguidas en el accidente.

Protección de las personas contra la exposición a la radiación

Después del accidente, las autoridades japonesas aplicaron los niveles de referencia de las dosis prudentes que figuraban en las recomendaciones de la ICRP recientes. La aplicación de algunas de las acciones y medidas de protección resultó difícil para las autoridades competentes y muy problemática para las personas afectadas.

Hubo algunas diferencias entre los criterios y orientaciones nacionales e internacionales para el control del agua potable, los alimentos y los productos de consumo no comestibles a plazo más largo después del accidente, una vez terminada la fase de emergencia.

Se concluyó que los órganos internacionales competentes deben elaborar explicaciones de los principios y criterios de la

protección radiológica que sean comprensibles para los no especialistas, a fin de aclarar su aplicación a los responsables de la adopción de decisiones y a la población. Puesto que algunas medidas de protección que se prolongaron en el tiempo tuvieron un efecto perturbador en las personas afectadas, se necesita una mejor estrategia de comunicación para dar a conocer la justificación de esas medidas y acciones a todos los interesados, incluida la población.

También se subrayó que las decisiones prudentes en relación con la actividad específica y las concentraciones de actividad en los productos de consumo y la actividad de la deposición dieron lugar a amplias restricciones, con las consiguientes dificultades. Se concluyó que en una situación de exposición prolongada, es ventajosa la coherencia entre las normas internacionales, y entre las normas internacionales y nacionales, en particular las relativas al agua potable, los alimentos, los productos de consumo no comestibles y la actividad de la deposición en la tierra.

Exposición a la radiación

A corto plazo, los factores más importantes que contribuyeron a la exposición de la población fueron: 1) la exposición externa causada por los radionucleidos presentes en el penacho que se emitió a la atmósfera como consecuencia del accidente y los depositados en la tierra; y 2) la exposición interna de la glándula tiroides, debida a la incorporación de yodo 131, y la exposición interna de otros órganos y tejidos causada principalmente por la incorporación de cesio 134 y cesio 137. A largo plazo, el contribuyente más importante a la exposición de la población será la radiación externa emitida por el cesio 137 depositado.

Las primeras evaluaciones de las dosis de radiación se basaron en la monitorización del medio ambiente y en modelos de estimación de las dosis, y en parte dieron valores sobreestimados. Para esas estimaciones se utilizaron vías de exposición teóricas, es decir trayectorias, secuencias de cambios o sucesos que hipotéticamente constituyen la progresión por la que las sustancias radiactivas se desplazan a través del medio ambiente y finalmente exponen a las personas a recibir dosis de radiación. Esas vías se caracterizan por muchos aspectos, entre ellos el proceso por el que las sustancias llegan al medio ambiente, los medios en los que se desplazan a partir de la fuente, el punto de exposición en que las personas se ven afectadas por la radiación, las rutas de exposición que describen las formas en que la radiación externa afecta a las personas y los modos en que las sustancias radiactivas pueden penetrar en el cuerpo (por ejemplo, mediante la ingestión de alimentos o bebidas o a través de la piel), y la población que puede estar expuesta. La Figura 51 presenta una descripción simplificada de las vías de exposición hipotéticas tras el accidente.

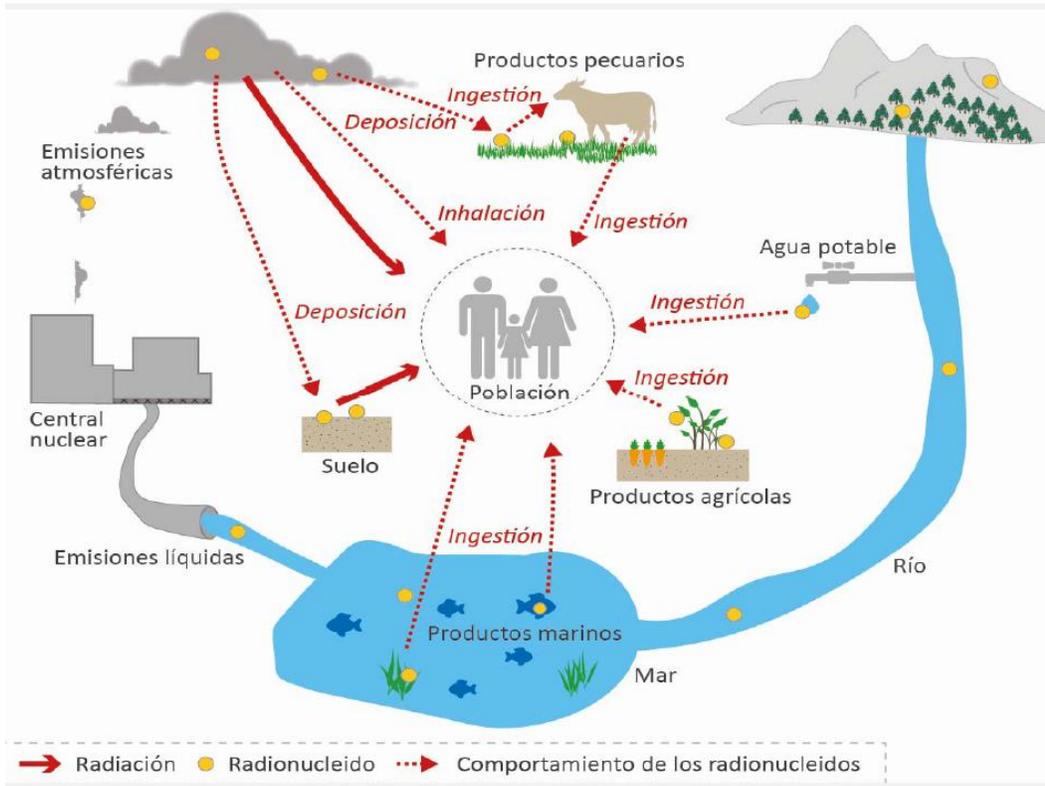


Figura 51. Vías de exposición hipotéticas tras el accidente

En las estimaciones más recientes se han incluido también los datos de monitorización individual que están llevando a cabo las autoridades locales para ofrecer una información más robusta sobre las dosis individuales reales que se recibieron y su distribución. Estas nuevas estimaciones indican que las dosis efectivas que recibieron los miembros de la población fueron bajas, comparables en general con el rango de dosis efectivas causadas por los niveles mundiales de radiación natural de fondo. La Figura 52 presenta las funciones densidad de probabilidad y de probabilidad acumulada para la dosis

efectiva incurrida en dos de las municipalidades mas expuestas (se preserva el nombre por razones legales).

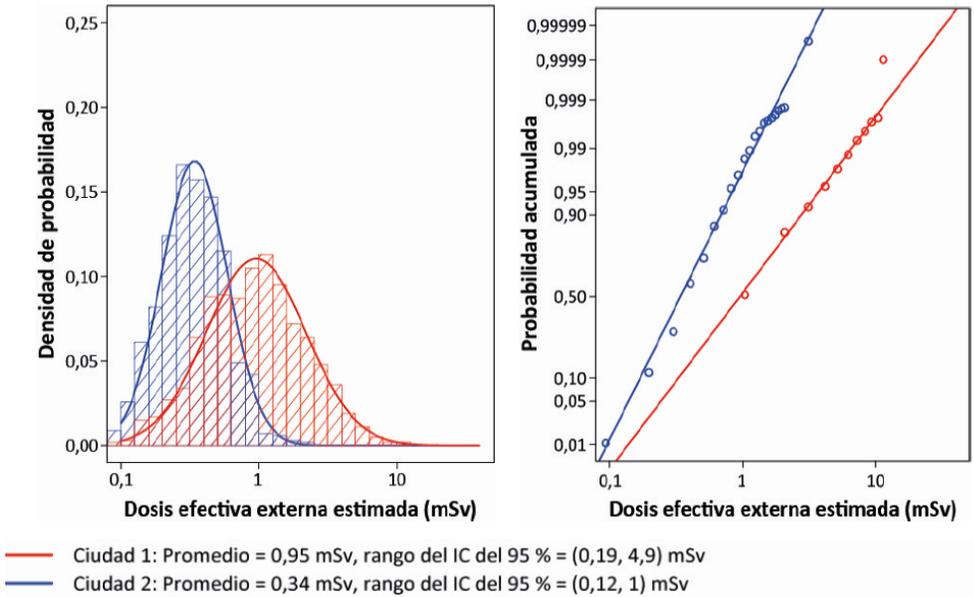


Figura 52. Distribución de probabilidad de las dosis equivalentes personales monitorizadas de los miembros de la población durante 2011 proporcionadas por el Gobierno del Japón para dos ciudades de la zona afectada respecto de las cuales se disponía de datos anualizados. Para la ciudad 1, se ilustra la distribución de la densidad de probabilidad normalizada idealizada (color rojo); para la ciudad 2, se ilustra la densidad de probabilidad normalizada idealizada (color azul); para ambas ciudades se da la distribución de probabilidad acumulada. La distribución muestra que las dosis equivalentes personales son bajas, con promedios inferiores a 1 mSv por año, lo que da un nivel de confianza del 95 % en que las personas que recibieron dosis efectivas en estas ciudades recibieron menos de 5 mSv.

Después de un accidente nuclear en que hay emisiones de yodo 131 y este es incorporado por los niños, su absorción y las dosis que se acumulan en la glándula tiroides son motivos de particular preocupación. Tras el accidente de Fukushima Daiichi, las dosis equivalentes en la glándula tiroides de los niños sobre las que se informó fueron bajas, porque su incorporación de yodo 131 fue limitada, gracias en parte a las restricciones impuestas al consumo de agua potable y alimentos, incluidas las hortalizas de hoja y la leche fresca. Hay incertidumbres con respecto a las incorporaciones de yodo inmediatamente después del accidente, debido a la escasez de datos fiables de monitorización radiológica individual para ese período.

En cuanto a la exposición ocupacional, se destaca que han participado en las operaciones de emergencia alrededor de 23 000 trabajadores de emergencias. Las dosis efectivas de radiación que han recibido la mayoría de ellos está por debajo de los límites de dosis ocupacionales vigentes en el Japón. De esas personas, 174 superaron el criterio inicial para los trabajadores de emergencias, y 6 superaron el criterio revisado temporalmente por la autoridad japonesa para la dosis efectiva en una emergencia. Hubo algunas deficiencias en la aplicación de los requisitos de protección radiológica ocupacional, por ejemplo en la monitorización y el registro de las dosis de radiación recibidas por los trabajadores de emergencias en el primer período, en la disponibilidad y utilización de algunos equipos de protección y en la capacitación conexas. La Figura 53 representa la distribución de dosis de los trabajadores afectados a la emergencia.

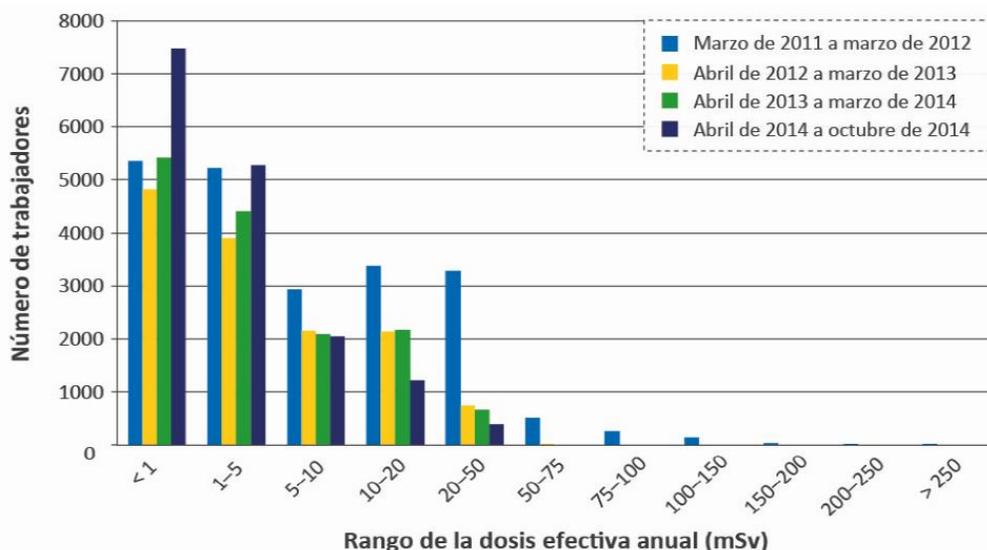


Figura 53. Comparación de la dosis efectiva recibida por los trabajadores de emergencias en el emplazamiento de la central nuclear de Fukushima Daiichi entre marzo de 2011 y octubre de 2014 (empleados de la TEPCO y contratistas). Durante el año del accidente se registraron altas dosis efectivas. En 2012, las dosis efectivas recibidas por los trabajadores ya eran bajas, comparables a las de las situaciones de funcionamiento normal.

Se concluyó que la monitorización radiológica individual de grupos representativos de la población proporciona información muy valiosa para obtener estimaciones fiables de las dosis de radiación, y debe utilizarse conjuntamente con mediciones ambientales y modelos adecuados de estimación de dosis para evaluar la dosis recibida por la población.

Si bien los productos lácteos no fueron la principal vía de ingestión de yodo radiactivo en el Japón, se confirmaron las lecciones ya aprendidas en el accidente de Chernobyl en que el

modo más importante de limitar las dosis recibidas por la tiroides, especialmente en el caso de los niños, es restringir el consumo de leche fresca de vacas en pastoreo.

También se concluyó que se necesita un sistema robusto de monitorización y registro de las dosis de radiación ocupacionales, por todas las vías pertinentes, especialmente las ocasionadas por la exposición interna en que puedan haber incurrido los trabajadores durante las actividades de gestión de un accidente severo. Es esencial que se disponga de equipo de protección individual adecuada y suficiente para limitar la exposición de los trabajadores durante las actividades de respuesta a una emergencia, y que los trabajadores estén suficientemente capacitados en el uso de ese equipo.

Efectos en la salud

A pesar de la severidad de la catástrofe, se destaca que no se observó ningún efecto temprano de la radiación en la salud de los trabajadores o de los miembros de la población que pudiera atribuirse al accidente.

El tiempo de latencia de los efectos tardíos de la radiación en la salud puede ser de decenios, por lo que no es posible descartar, mediante observaciones hechas pocos años después de la exposición, que esos efectos se produzcan en algún momento en la población expuesta. Sin embargo, dados los bajos niveles de dosis notificados con respecto a la población, se ha concluido que no se prevé un aumento discernible de la incidencia de efectos en la salud relacionados con la radiación entre la población general expuesta y su descendencia.

Con respecto al grupo de trabajadores que recibieron dosis efectivas de 100 mSv o superiores, se ha concluido que

cabría esperar un mayor riesgo de cáncer en el futuro. Sin embargo, no se prevé un aumento perceptible de la incidencia de cáncer en ese grupo a causa de la dificultad de confirmar una incidencia tan reducida en comparación con las fluctuaciones estadísticas normales de la incidencia de cáncer.

Se destaca que la Universidad Médica de Fukushima emprendió un *Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima* con el objeto de monitorizar la salud de la población afectada de la prefectura de Fukushima. Este estudio tiene por objeto detectar y tratar precozmente las enfermedades, y también prevenir las enfermedades relacionadas con el modo de vida, y tiene en curso una exploración intensiva de la glándula tiroides de niños. Se está empleando equipo de alta sensibilidad, que ha detectado anomalías asintomáticas de la tiroides (que no se habrían detectado por medios clínicos) en un número importante de niños examinados. Es poco probable que las anomalías encontradas en el estudio estén asociadas con la exposición a la radiación causada por el accidente; lo más probable es que denoten la prevalencia normal de anomalías de la tiroides en los niños de esa edad. El cáncer de tiroides en los niños es el efecto en la salud más probable tras un accidente con emisiones importantes de yodo radiactivo. Como las dosis en la tiroides atribuibles al accidente que se comunicaron fueron bajas en general, es poco probable que se produzca un aumento del cáncer de tiroides infantil atribuible al accidente. Sin embargo, persisten incertidumbres con respecto a las dosis equivalentes en la tiroides recibidas por los niños inmediatamente después del accidente.

No se han observado efectos prenatales de la radiación y no se prevé que se produzcan, dado que las dosis notificadas son muy inferiores a los umbrales a los que pueden generarse esos

efectos. No se han notificado abortos no deseados atribuibles a la situación radiológica. En cuanto a la posibilidad de que la exposición de los padres tenga efectos hereditarios en sus descendientes, se ha concluido que, en general, si bien se ha demostrado un aumento de la incidencia de los efectos hereditarios en estudios hechos con animales, en los seres humanos por el momento esos efectos no pueden atribuirse a la exposición a radiaciones.

Se ha informado de la existencia de algunos trastornos psicológicos entre la población afectada por el accidente nuclear. Puesto que esas personas sufrieron los efectos combinados de un gran terremoto y un tsunami devastador, junto con el accidente, es difícil determinar en qué medida esos efectos podrían atribuirse al accidente nuclear por sí solo. Un *Estudio sobre la Salud Mental y el Modo de Vida*, efectuado en el marco del *Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima*, revela la existencia de problemas psicológicos relacionados con lo ocurrido en algunos grupos vulnerables de la población afectada, por ejemplo aumentos de la ansiedad y trastornos de estrés postraumático. En efecto, se ha concluido que el efecto más importante del accidente desde el punto de vista de la salud es el que se produce en el bienestar mental y social y que guarda relación con el enorme impacto del sismo, el tsunami y el accidente nuclear, y el temor y el estigma relacionados con el riesgo percibido de exposición a la radiación ionizante.

Se ha concluido además que los riesgos de la exposición a la radiación y la atribución a la radiación de los efectos observados en la salud tienen que explicarse claramente a las partes interesadas, señalando de manera inequívoca que los aumentos en la incidencia de efectos en la salud en la población no son atribuibles a la exposición a la radiación, si los niveles de

esta son similares a los niveles globales medios de fondo de la radiación.

Con relación al *Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima* se ha concluido que los estudios sobre la salud realizados después de un accidente nuclear son muy importantes y útiles, pero no deben interpretarse como estudios epidemiológicos. Los resultados de esos estudios sobre la salud tienen por objeto proporcionar información para respaldar la prestación de asistencia médica a la población afectada.

Finalmente se ha enfatizado que se necesita orientación sobre la protección radiológica para hacer frente a las consecuencias psicológicas en los miembros de las poblaciones afectadas después de un accidente radiológico. Un grupo de tareas de la ICRP ha recomendado que se elaboren estrategias para mitigar las graves consecuencias psicológicas derivadas de los accidentes radiológicos.

Es claro que debe comunicarse información objetiva, comprensible y oportuna sobre los efectos de la radiación a las personas de las zonas afectadas, para aumentar su entendimiento de las estrategias de protección, aliviar sus preocupaciones y apoyar sus propias iniciativas de protección.

Consecuencias radiológicas para la biota no humana

No se han comunicado observaciones de efectos directos en las plantas y los animales provocados por la radiación, aunque se realizaron estudios observacionales limitados en el período inmediatamente posterior al accidente. Hay limitaciones en las metodologías disponibles para evaluar las consecuencias radiológicas, pero, teniendo en cuenta la experiencia anterior y los niveles de radionucleidos presentes

en el medio ambiente, es improbable que se registren consecuencias radiológicas importantes para las poblaciones de la biota o los ecosistemas como consecuencia del accidente.

Es claro que durante la fase de emergencia la atención debe centrarse en proteger a las personas. Las dosis recibidas por la biota no se pueden controlar, pero podrían ser importantes a nivel individual. El conocimiento de las repercusiones de la exposición a la radiación en la biota no humana debe fortalecerse mejorando la metodología de evaluación y la comprensión de los efectos que la radiación provoca en las poblaciones de la biota y los ecosistemas. Después de una emisión grande de radionucleidos al medio ambiente, debe adoptarse una perspectiva integrada para asegurar la sostenibilidad de la agricultura, la silvicultura, la pesca y el turismo, así como el uso de los recursos naturales.

Restauración de zonas afectadas por el accidente

El objetivo a largo plazo de la protección radiológica es la recuperación, es decir restablecer una base aceptable para que pueda existir una sociedad que funcione plenamente en las zonas afectadas. Es preciso tomar en consideración la restauración de las zonas afectadas por el accidente a fin de reducir las dosis de radiación, de acuerdo con los niveles de referencia que se hayan adoptado. En la preparación para el regreso de los evacuados conviene tener en cuenta factores como la reparación de la infraestructura, así como la viabilidad y sostenibilidad de las actividades económicas de la comunidad.

Este es un gran desafío para la protección radiológica y esta en pleno desarrollo.

EPÍLOGO

Esta memoria ha demostrado la notable evolución de la disciplina de la protección radiológica. También ha demostrado que el impacto principal de la exposición a las radiaciones de encuentra en la radiación natural y médica, aun cuando se tengan en cuenta catástrofes impensadas como la de Fukushima Daiichi. Sin embargo debe reconocerse que la mayor preocupación de protección radiológica de la población en general se centra en la energía nuclear.

En este contexto vale preguntarse si ¿la humanidad necesita correr riesgos radiológicos para satisfacer sus necesidades energéticas? Se ha visto que los riesgos radiológicos de la energía nuclear son nimios. Más aún, si se abandonara la energía nuclear, la fuente de energía que la reemplazará no será ni los biocombustibles, ni el agua, ni el viento, ni el sol, ¡sino más combustibles fósiles! La energía hídrica disponible se está agotando y la eólica y solar no son suficientes y no están disponibles cuando se las necesita. Y es prudente reconocer que los combustibles fósiles son la némesis de la protección humana y ambiental. Los combustibles fósiles son muchas veces peores que la energía nuclear para la salud pública y para el medio ambiente, por razones de cambio climático, de impacto de la minería, de contaminación del hábitat, por sus accidentes y muertes laborales, y ¡aun por la exposición a la radiación y las descargas radiactivas!

En resumen: La energía nuclear ha sido objeto de una dura prueba con el accidente de Fukushima Daiichi, y el impacto en las personas y el planeta no ha sido comparable al de los combustibles fósiles. ¡La historia y sucesos de la protección radiológica y el epílogo de la crisis de Fukushima

Daiichi debería haber convencido a los tomadores de decisión mundiales que es factible que la energía nuclear ayude a las energías renovables a proteger a la humanidad de las consecuencias de utilizar combustibles fósiles y mas aun de la falta de energía!