



UNIDAD DIDÁCTICA 4

CONSECUENCIAS RADIOLÓGICAS Y MEDIDAS DE PROTECCIÓN



Introducción



Vídeo Introducción: <https://www.youtube.com/watch?v=Lx86jGw6iCA>

4.1 Conceptos básicos de radiactividad

Introducción

La radiactividad es un fenómeno físico-químico por el que algunos cuerpos emiten radiaciones ionizantes de varios tipos: radiaciones α (alfa), β (beta), γ (gamma) y neutrones; que pueden interactuar con la materia viva.

El objetivo de la protección radiológica es, de acuerdo con la IAEA, proteger a trabajadores, público y medio ambiente de las radiaciones que emite toda industria que utiliza, tanto fuentes, como mecanismos emisores de radiación.

Pero antes de plantearse cómo protegerse de ellas, se debe comprender cómo afectan las radiaciones ionizantes y cómo se puede detectar su presencia.

La radiación

La radiación no es otra cosa que la emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier medio en forma de ondas electromagnéticas o partículas, aunque la mayoría de las radiaciones son de origen electromagnético.

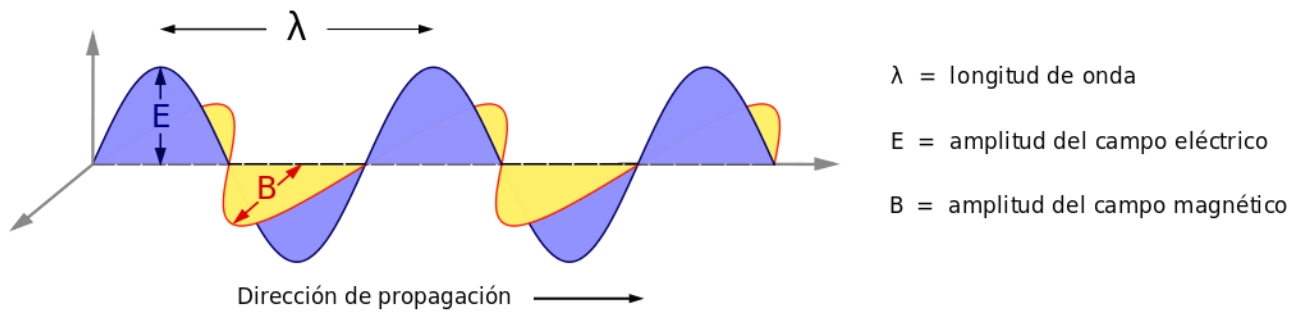
La energía que transporta una radiación electromagnética se desplaza mediante ondas. Esta energía no es continua, sino que se transmite agrupada en pequeños "cuantos" de energía llamados fotones. La onda se compone de un campo eléctrico oscilante, asociado a un campo magnético también oscilante, y ambos son perpendiculares a la dirección de propagación.

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por tres parámetros fundamentales: Longitud de onda, Frecuencia y Energía:

- Longitud de onda (λ): Es la distancia entre las crestas de dos ondas consecutivas, y se mide en unidades de longitud (m). La amplitud de la onda depende de la potencia radiante de la fuente emisora.
- Frecuencia (ν ó f): Es el número de veces que oscila una onda en un segundo y se mide en ciclos/segundo o hercios (Hz).
- Energía (E): La energía transportada por una radiación electromagnética se puede medir en Julios (J), aunque más frecuentemente se mide en electronvoltios (eV). El electronvoltio representa la energía cinética que adquiere un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1 voltio. Equivale a $1,602176462 \times 10^{-19}$ J.

En la figura 1 podemos observar de forma gráfica estos tres parámetros.

Figura 1. Parámetros fundamentales de una onda electromagnética.



λ = longitud de onda

E = amplitud del campo eléctrico

B = amplitud del campo magnético

Fuente: Jfmelero como trabajo derivado de Parri
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:OndaElectromagnetica.svg> (19/05/2016)
 CC BY 3.0

La frecuencia es directamente proporcional a la energía que transporta una radiación. Así, a mayor frecuencia, menor longitud de onda y mayor energía de la radiación.

En la figura 2 se muestran los distintos tipos de radiaciones electromagnéticas ordenadas por energía (de menor a mayor). Es lo que se conoce como **espectro electromagnético**:

Figura 2. Tipos de radiación electromagnética



Fuente: André Oliva
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3AElectromagnetic_spectrum_\(es\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3AElectromagnetic_spectrum_(es).png) (19/05/2016)
 Dominio Público

Las radiaciones electromagnéticas se clasifican en dos grandes grupos en función de su energía, o dicho de otra manera en función del tipo de cambios que provocan en los átomos con los que interactúan:

- **Radiaciones no ionizantes.** Estas radiaciones no tienen suficiente energía para producir ionizaciones en los átomos con los que interactúan y de ahí su nombre.
- **Radiaciones ionizantes.** Corresponden a las radiaciones de mayor energía (menor longitud de onda) dentro del espectro electromagnético. Tienen energía suficiente

como para arrancar electrones de los átomos con los que interaccionan, es decir, para producir ionizaciones.

Radiaciones no ionizantes

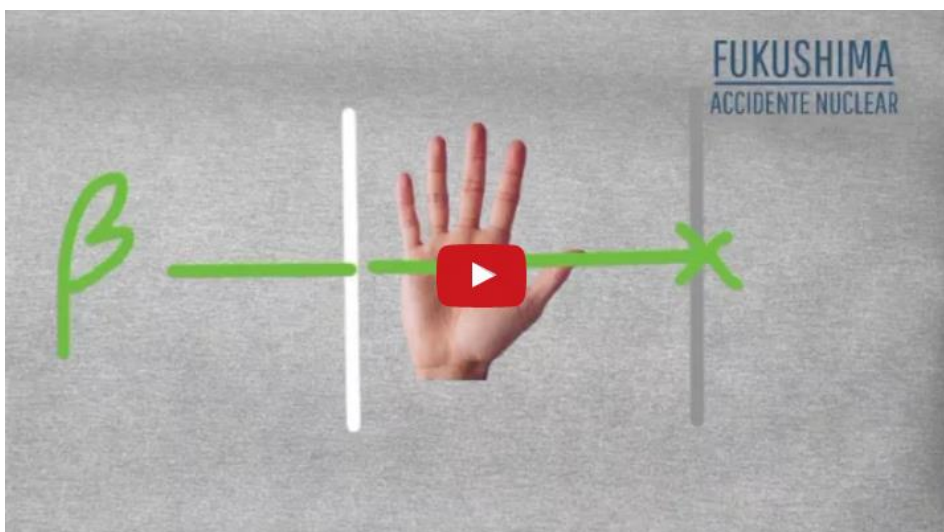
Las radiaciones no ionizantes son de baja energía, es decir, no son capaces de ionizar la materia con la que interaccionan. Estas radiaciones se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- **Radiaciones electromagnéticas.** A este grupo pertenecen las radiaciones generadas por las líneas de corriente eléctrica o por campos eléctricos estáticos. Otros ejemplos son las ondas de radiofrecuencia, utilizadas por las emisoras de radio y las microondas utilizadas en electrodomésticos y en el área de las telecomunicaciones.
- **Radiaciones ópticas.** Pertenecen a este grupo los rayos infrarrojos, la luz visible y la radiación ultravioleta.

Radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes están formadas por partículas o por ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia con la suficiente energía como para producir la ionización de un átomo y romper los enlaces atómicos que mantienen las moléculas unidas en las células. Estas alteraciones pueden ser más o menos graves según la dosis de radiación recibida.

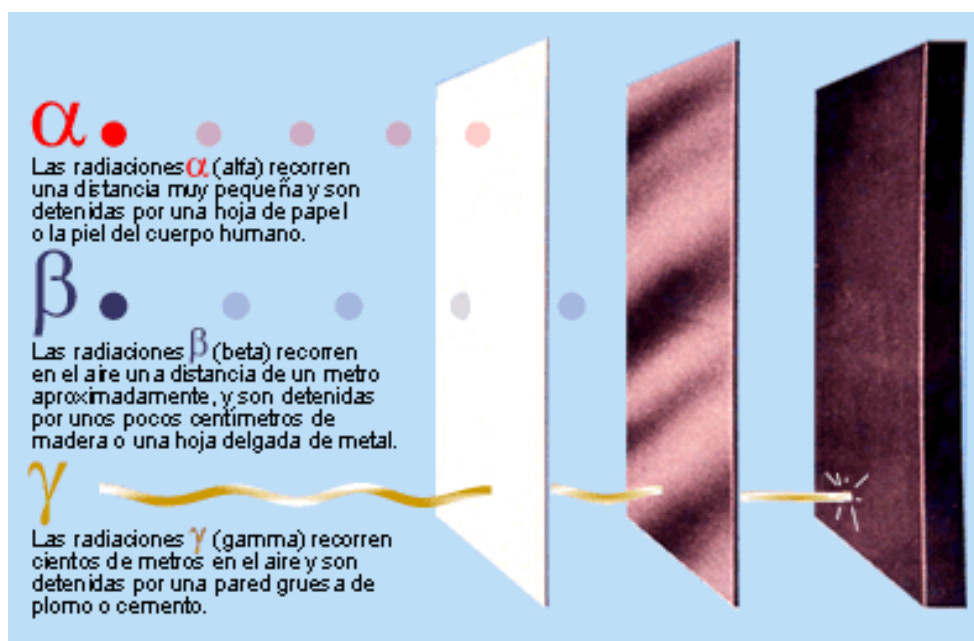
Existen varios tipos de radiaciones ionizantes: las radiaciones alfa, las radiaciones beta, las radiaciones gamma, los rayos X y los neutrones.



Vídeo 1 Radiaciones Ionizantes: <https://www.youtube.com/watch?v=b50G8Q2XwLw>

Podemos ver la interacción de las distintas partículas con la materia en la figura 3.

Figura 3. Radiaciones alfa, beta y gamma



Fuente: Rincón educativo. Foro Nuclear

<http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/radiaciones.gif> (19/05/2016)

CC 2.5

Radiaciones ionizantes de origen natural

La radiación ionizante forma parte de nuestra vida cotidiana, ya que es un agente natural con el que convivimos. Es más, como dijo Eric J. Hall, Profesor de la Universidad de Columbia (Nueva York): "La vida en la tierra se ha desarrollado en presencia de radiación. No es nada nuevo, inventado por el hombre. La radiación siempre ha estado aquí".

La radiación ionizante natural (o de fondo) puede tener orígenes muy diversos: los rayos cósmicos, la tierra, el cuerpo humano o el aire que respiramos.

Los rayos cósmicos se descubrieron en 1912 por el físico austriaco Victor Franz Hess. Ahora se sabe que la mayoría de los rayos cósmicos son, en realidad, núcleos atómicos de hidrógeno, helio o elementos pesados. La mayor parte de los rayos cósmicos de menor energía provienen del Sol, pero se desconoce el origen de los rayos cósmicos de muy alta energía. Esta clase de lluvia de partículas de alta energía se produce cuando rayos cósmicos energéticos golpean la parte superior de la atmósfera terrestre.

-Profundiza 1-

El aire que respiramos contiene un gas radiactivo llamado radón, el cual se produce cuando hay una desintegración del elemento radiactivo uranio, que se encuentra en la corteza terrestre. El radón es un gas invisible, inodoro, insípido, 7 veces más pesado que el aire. Cuando el radón escapa al aire libre se dispersa rápidamente y sus concentraciones son bajas. Sin embargo,

cuando entra en un edificio, a través del suelo o de los propios muros, la concentración aumenta a menos que el edificio sea adecuadamente ventilado.

La cantidad de radón emanada del suelo varía en función del tipo de suelo, en concreto depende del contenido de uranio que tenga. En el granito hay cuarzo, mica y feldespato, pero también hay otros elementos en menor cantidad, entre ellos uranio. El uranio natural uranio-238 (que no debe confundirse con el combustible nuclear uranio-235) se puede convertir en radio (como descubrió el matrimonio Curie) y éste libera radón. Por tanto, en los terrenos con mayor cantidad de granito habrá más producción de gas radón, como por ejemplo en la Sierra de Guadarrama del Sistema Central.

El radón es el responsable de casi la mitad de las dosis de radiación natural total que recibimos.

En la corteza terrestre también encontramos materiales radiactivos naturales. Éstos son absorbidos por las plantas y los animales y se disuelven en el agua. Por tanto los alimentos y líquidos que ingerimos contienen cantidades variables, aunque pequeñas, de isótopos radiactivos. Algunos alimentos contienen más radiactividad que otros y las personas que toman grandes cantidades de ellos pueden recibir por tanto mayor dosis. Estos alimentos incluyen nueces de Brasil, té, café y pan. Esto no significa que deban evitarse estos alimentos ya que la dosis resultante es muy pequeña y no hay evidencia de riesgo para la salud. En realidad una dieta basada en una radiactividad mínima representaría un riesgo mucho mayor debido a una nutrición inadecuada.

Los principales radionucleidos en nuestro organismo son el carbono-14, el tritio, y el potasio-40. El potasio-40 aporta una dosis de radiación de unos 0,2 mSv/año.

Puesto que en la corteza terrestre existen materiales radiactivos naturales, estamos expuestos a radiación directamente del suelo y de las rocas superficiales. También podemos recibir radiación procedente de los materiales de construcción, como ladrillos y hormigón, hechos a base de materiales extraídos de la tierra.

Los principales materiales radiactivos presentes en las rocas son el potasio-40, el rubidio-87 y dos series de elementos radiactivos procedentes de la desintegración del uranio, el uranio-238 y el torio-232.

Una característica distintiva de la radiación natural es que afecta a toda la población con una intensidad relativamente constante a lo largo del tiempo.

La dosis medida per cápita de radiaciones ionizantes de origen natural es del orden de 2,4 mSv al año. En España recibimos una dosis de entre 2,4 y 3,0 mSv al año.

Radiaciones ionizantes de origen artificial

A la radiación ionizante de origen natural, anteriormente mencionada, se le ha sumado la radiación ionizante artificial que el ser humano aprendió a producir para satisfacer sus necesidades e intereses. Ambas radiaciones, natural y artificial, se comportan de la misma forma.

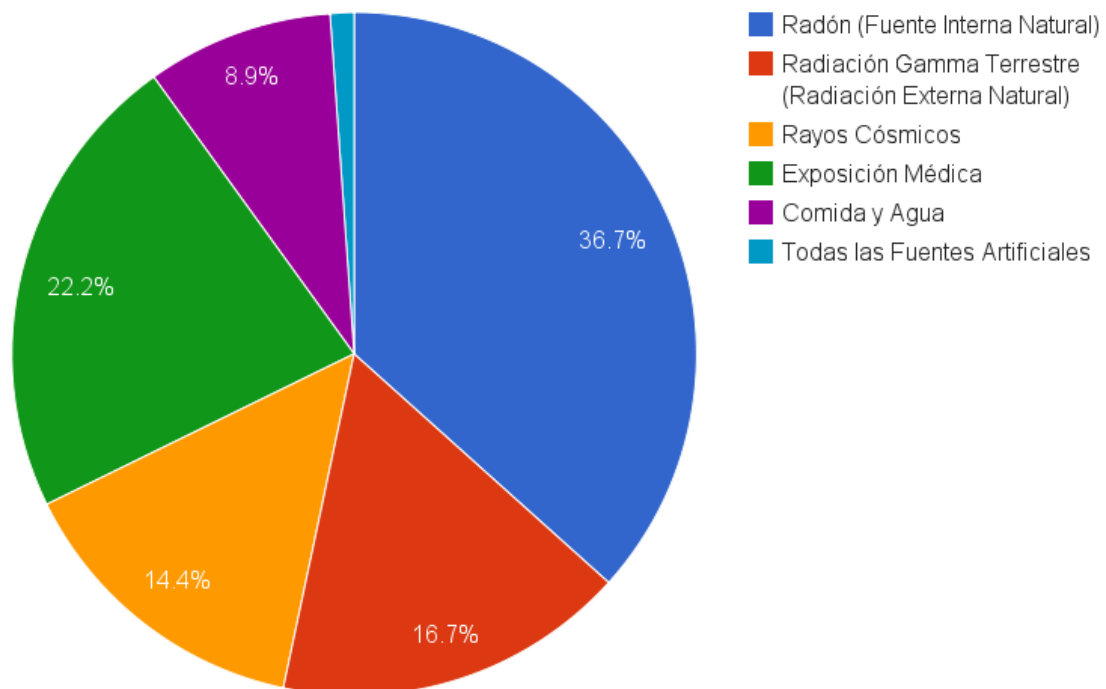
Las radiaciones ionizantes tienen muchas aplicaciones beneficiosas para el hombre en áreas tan distintas como la medicina, la conservación del medio ambiente, la industria, agroalimentación, la erradicación de plagas de insectos y la producción de energía.

Las fuentes artificiales de radiaciones ionizantes pueden ser controladas más eficazmente que las fuentes naturales y de este control se encarga la protección radiológica.

En la figura 4 podemos ver como se distribuye la exposición de los humanos a las radiaciones ionizantes.

Figura 4. Exposición a las radiaciones ionizantes en humanos.

Exposición a las Radiaciones Ionizantes en Humanos



Fuente: Por Rsaer como derivado de un trabajo original de Pabloes https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Exposicion_humanos.png (12/01/2016) CC-BY-SA 3.0

La ONU, a través de su Comité Científico para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas, indica que casi el 90% de las radiaciones ionizantes que recibe una persona a lo largo de su vida es de origen natural y sólo el 10% restante tienen origen artificial.

Medida de las radiaciones ionizantes

Las magnitudes y sus correspondientes unidades más utilizadas para medir las radiaciones ionizantes y los compuestos radiactivos son:

Tabla 1. Magnitudes y unidades de medida

Magnitud	Proceso físico medido	Unidades S.I.
Actividad	Desintegración nuclear	Becquerel (Bq)
Dosis absorbida	Energía depositada	Gray (Gy)
Dosis equivalente	Efecto Biológico	Sievert (Sv)
Dosis efectiva	Riesgos	Sievert (Sv)

Actividad radiactiva: Se mide en becquerelios (Bq), que es una unidad derivada del Sistema Internacional de Unidades, que equivale a una desintegración nuclear por segundo. Los becquerelios indican la velocidad de desintegración de una sustancia radiactiva. A mayor cantidad de becquerelios más rápidamente se desintegrará (mayor número de desintegraciones por segundo) y por tanto más “activa” sería la sustancia.

Ahora bien, la actividad (o los Bq) no nos da información sobre los posibles efectos que una fuente de radiación podría tener en nuestra salud. Una fuente de 100.000 millones de Bq puede ser totalmente inocua (si se encuentra blindada o lejos de nosotros) o puede causar un serio daño a nuestra salud (si por accidente la ingiriéramos).

Para conocer las posibles consecuencias en la salud de una exposición a radiación ionizante, se necesita por tanto otro concepto que indique la cantidad de energía absorbida por los tejidos y permita cuantificar el daño biológico causado. En definitiva, es necesario conocer la "DOSIS" de radiación recibida.

Las radiaciones ionizantes interaccionan con la materia depositando en ella energía, produciendo ionizaciones y por tanto alteraciones en las moléculas de las células. El daño biológico producido por las radiaciones ionizantes está relacionado con la energía depositada por unidad de masa, que es la magnitud conocida como **dosis absorbida**.

Como ya sabemos, la energía en el Sistema Internacional, se mide en julios (J) y la masa en Kilogramos (Kg), por tanto la dosis absorbida se medirá en J/Kg, unidad conocida con el nombre de Gray (Gy).

Pero el daño biológico producido por las radiaciones no sólo está en función de la energía depositada en un tejido u órgano, sino que también depende del tipo de radiación. No todas las radiaciones producen la misma densidad de ionización cuando atraviesan la materia viva. Por ejemplo, las partículas alfa producen mucha mayor densidad de ionización en la materia que atraviesan que los rayos gamma, para la misma dosis absorbida. Se sabe que las radiaciones que producen mayor densidad de ionización son más dañinas a igualdad de dosis.

La **Dosis Equivalente**, es la magnitud utilizada para expresar la cantidad de energía depositada por unidad de masa (dosis absorbida) y el tipo de radiación que suministra dicha energía. Esta magnitud también se mide en J/Kg, pero recibe el nombre de Sievert (Sv).

Por último, se sabe que el daño producido por las radiaciones ionizantes en un ser vivo, además de depender de la dosis absorbida y del tipo de radiación, también está influenciado por el tejido u órgano que ha sufrido la irradiación. Esto se debe a que no todos los tejidos de nuestro organismo son igual de sensibles a la radiación y por tanto no todos ellos contribuirán de igual forma al perjuicio que la exposición tendrá en nuestra salud. Para tener en cuenta este factor, se ha definido la magnitud **Dosis Efectiva**, que al igual que la dosis equivalente, se mide en Sv (J/Kg).

Para entender todas estas magnitudes, vamos a imaginarnos que estamos debajo de una tormenta de granizo. La cantidad de granizo que cae representa la actividad radiactiva, pero no todos los granizos que caen nos alcanzarán. Aquellos que impacten con nuestro cuerpo son los que nos van a producir daño, por tanto el número de granizos que nos alcancen representará la dosis absorbida.

Pero, el daño que nos produzca el granizo no sólo dependerá del número de ellos que nos alcancen, sino que también va a depender del tamaño de éstos. A igualdad de número de granizos que nos impacten, cuanto mayor sea su tamaño más daño nos hará. El número de granizos que nos alcanzan y su tamaño es lo que, para las radiaciones ionizantes, nos indica la dosis equivalente.

Por último, si realmente queremos saber el daño que nos producirá el granizo, además del número que nos impacta y su tamaño, tendremos que tener en cuenta en qué parte de nuestro cuerpo nos alcanzan, ya que no todas ellas son igual de sensibles. Lo mismo ocurre con las radiaciones ionizantes y los tejidos de nuestro cuerpo y por eso es necesario utilizar la dosis efectiva.

Hay una magnitud que también va a influir en el efecto que produzca la radiación ionizante en nuestra salud: la Tasa de Dosis que indica la dosis de radiación recibida por unidad de tiempo. Se sabe que una misma dosis recibida durante un largo periodo de tiempo es menos nociva que si esa misma dosis se recibe en segundos o minutos.

En la actualidad existe una gran variedad de instrumentos que permiten medir las radiaciones ionizantes: contadores de radiactividad y dosímetros.

Un dosímetro es un instrumento que permite medir la dosis de radiación ionizante. Existen una gran variedad de dosímetros, por lo que es importante seleccionar el más adecuado en función de la utilización que esté prevista. Así, existen dosímetros personales o de área.

Los dosímetros personales se utilizan cuando es necesario medir la dosis recibida por una persona determinada. Existen distintos tipos de dosímetros personales: de solapa, de muñeca o anillo, utilizándose uno u otro dependiendo de la zona del cuerpo que pudiera recibir la irradiación.

Los dosímetros de área se utilizan cuando no es necesario conocer la dosis recibida por una persona determinada, pero si es necesario conocer las dosis recibidas en lugares o puestos de trabajo.

-Profundiza 2-

4.2 Efectos de la radiación sobre la salud.

Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes

Siempre que se reciba una cierta dosis de radiación hay algún riesgo. Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos llevan siendo estudiados desde hace más de 70 años, y en la actualidad, puede decirse que son bien conocidos. La experiencia acumulada en el seguimiento de los supervivientes de las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki, nos permiten disponer de una base de datos bien contrastada.

La respuesta celular a la radiación no es igual para todas las células, ya que su radiosensibilidad es muy diferente. La interacción de la radiación con las células produce alteraciones en las moléculas de ADN, ARN y otros componentes biológicos, formando pares de iones y radicales libres que pueden dañar las estructuras celulares.

Según la intensidad de la radiación, los daños causados pueden producir retrasos y alteraciones en la reproducción o muerte celular.

La respuesta a la radiación de los diferentes órganos, depende de los tejidos que los componen y de sus poblaciones celulares, así como de las características físicas de la radiación. Aquellos órganos que se ven más afectados por la radiación y dan lugar a consecuencias más graves para el organismo son denominados **ÓRGANOS CRÍTICOS**. Los principales son la médula ósea, donde se producen las células sanguíneas, el intestino delgado, en que se realiza la digestión y la absorción de alimentos, y las gónadas, donde se producen y maduran las células germinales.

Según la relación CAUSA-EFECTO entre la radiación recibida y los daños producidos, los efectos biológicos se clasifican en:

- **ESTOCÁSTICOS (ALEATORIOS)**: la gravedad no depende de la dosis. En el caso de producirse son siempre graves y comprenden la posible aparición de tumores malignos del tipo de leucemias, cánceres de pulmón, piel, etc. y las alteraciones genéticas que dan lugar a las anomalías hereditarias.
- **NO ESTOCÁSTICOS (CAUSALES)**: la gravedad depende de la dosis recibida, siendo las lesiones más severas cuanto mayor sea la cantidad de radiación recibida, llegando a provocar incluso la muerte. Por debajo de una dosis mínima no tienen lugar. En general, se producen cuando altas dosis de radiación afectan a órganos como la médula ósea, el aparato digestivo, la piel, los testículos y los ovarios.

Según la RELACIÓN TEMPORAL entre el momento en que tiene lugar la irradiación y el tiempo que transcurre hasta que se manifiestan las lesiones, se clasifican en:

- **EFECTOS INMEDIATOS**: se manifiestan entre unas horas o unas semanas, causando la muerte cuando los niveles de radiación recibida por todo el cuerpo son elevadas, o causando un simple enrojecimiento de la piel, cuando las dosis elevadas de radiación son recibidas en una determinada zona del cuerpo durante un corto período de tiempo.
- **EFECTOS RETARDADOS**: se manifiestan cuando el cuerpo humano es sometido a bajas dosis de radiación o a una dosis mayor, pero que es recibida a lo largo de un gran período de tiempo. Suelen provocar la aparición de cáncer o enfermedades congénitas.

Según aparezcan los efectos en los individuos o en sus descendientes, se clasifican en:

- **SOMÁTICOS:** aparecen cuando los daños se manifiestan durante la vida del individuo irradiado. A su vez se dividen en inmediatos o retardados, en función del tiempo transcurrido desde su irradiación:
 - **Somáticos retardados:** aparecen en la persona irradiada en un intervalo de tiempo que puede ir desde unos días hasta semanas después de la exposición. Se supone que existe en cierta medida, un proceso de recuperación celular como ocurre en el caso de una fibrosis pulmonar causada por una dosis excesiva de radiación, o los eritemas de la piel.
 - **Somáticos inmediatos:** ocurren al azar dentro de una población de individuos irradiados. La relación entre la inducción de una enfermedad (leucemia, tumor, etc.) y la dosis, sólo puede establecerse sobre grandes grupos de población irradiada. Se manifiestan entre 10 y 40 años después de la exposición. Es frecuente encontrar períodos de latencia de 20-26 años para cánceres inducidos por radiación y de 10-15 años en el caso de leucemias.
- **GENÉTICOS:** aquellos en que los daños se manifiestan en la descendencia del individuo irradiado, ya que la radiación ha producido lesiones en sus células reproductoras. No deben confundirse los efectos hereditarios causados por la irradiación de las células germinales, que experimentan mutaciones y dan lugar a anomalías hereditarias, con la irradiación de las gónadas, que pueden degenerar en esterilidad, y que depende de la gravedad de la dosis. Pueden aparecer en la primera generación, o más frecuentemente en los individuos de las generaciones sucesivas, como enfermedades hereditarias, defectos mentales, anomalías óseas, etc. Son efectos estocásticos, ya que dependen de que una célula germinal con una mutación relevante tome parte o no en la reproducción.

Efectos deterministas y probabilistas

Efectos deterministas: si el daño no se consigue reparar y se ha producido en una zona fundamental de la célula se producirá la muerte celular. Esto resulta peligroso si ocurre en una gran cantidad de células del cuerpo, especialmente si éstas forman parte de órganos indispensables para las acciones vitales del organismo. El daño aparece en forma de quemadura, tanto externa como interna (esto depende del tipo y forma en que se haya recibido la radiación). Es un daño que aparece poco después de la exposición y a partir de un límite de dosis, es suficiente para causar daño en una gran cantidad de células. De hecho, este método es el que aprovecha la medicina actual en muchos tratamientos de radioterapia, en los que la aplicación de altas dosis sobre zonas cuidadosamente escogidas provoca la eliminación de tumor.

Efectos probabilistas: cuando el daño se produce en una zona importante del ADN de una célula con alta capacidad de reproducirse y además no se logra reparar correctamente, la célula podría dar lugar a una estirpe de células vivas que consumen recursos sin realizar su cometido en el cuerpo; he aquí el riesgo de cáncer e incluso de posterior metástasis. El daño probabilista es un daño que aparece mucho tiempo después de haber sido recibida la dosis (diferido en el tiempo) y presenta un carácter marcadamente probabilista, ya que son muchos los factores que influyen en el desarrollo de un tumor. Para este tipo de efectos se supone de forma conservadora que

no existe un límite de dosis, es decir, se considera que cualquier dosis, por pequeña que sea, es susceptible de provocarlos.

Irradiación y Contaminación Radiactiva

Se define la irradiación como la acción por la cual una persona u objeto se ve sometida o expuesta a los efectos de las radiaciones ionizantes. Se distinguen dos tipos:

- Irradiación interna: se produce por la inhalación, ingestión o absorción a través de la piel, de sustancias radiactivas, de modo que pasan a formar parte del organismo. La irradiación interna se debe a las radiaciones alfa, beta y gamma.
- Irradiación externa: se produce cuando la fuente de radiación es externa al individuo, que está a cierta distancia de ella e interacciona con la radiación emitida por dicha fuente. La dosis recibida depende de la intensidad de la radiación, de la distancia al foco emisor y del tiempo de exposición de la radiación. Este tipo de irradiación se produce por fuentes emisoras de neutrones, radiaciones gamma y beta, ya que la radiación alfa tiene un alcance muy limitado. La protección contra este tipo de radiaciones consiste en el empleo de blindajes, cuyo tamaño y composición depende del tipo de irradiación, siendo el plomo el material más empleado contra radiaciones gamma, el hormigón con láminas de boro contra los neutrones y el aluminio contra la radiación beta.

Se define contaminación como la presencia indeseada de sustancias radiactivas en la superficie o en el interior del organismo. Hay dos tipos:

- Contaminación externa: cuando las sustancias radiactivas se depositan sobre la piel. Debe eliminarse antes de que pueda incorporarse al organismo a través de heridas, orificios naturales o por inhalación. En primer lugar, hay que despojarse de la ropa e introducirla en bolsas de plástico. Luego hay que darse una ducha con agua tibia y jabón neutro cuando la contaminación es difusa, o un simple lavado de la zona contaminada cuando ésta se dé en una zona concreta. Esta operación se repetirá hasta que el detector que la controla determine la ausencia de radiación. En el caso de heridas, es aconsejable el lavado con suero fisiológico y aplicación de antisépticos y apósitos estériles.
- Contaminación interna: cuando los isótopos radiactivos penetran en el organismo por ingestión, inhalación o a través de heridas. La gravedad de sus efectos depende del tipo de partícula emitida por la fuente radiactiva, del tipo de órganos sobre los que se depositan las partículas, del tiempo de permanencia y del período de semidesintegración de los radionucleidos, y de la capacidad de eliminación de la sustancia radiactiva a través de las vías naturales. Como consecuencia del metabolismo del radionucleido contaminante, se depositará en uno o varios órganos, a partir de los cuales irradiará las células y los tejidos. Por ejemplo, el yodo se fija en el tiroides, el cesio en los músculos y el estroncio en los huesos. Las primeras medidas tomadas para eliminar los radionucleidos comienzan por ingerir líquidos abundantes o laxantes suaves, así como medicamentos que bloqueen su captación por los órganos críticos.

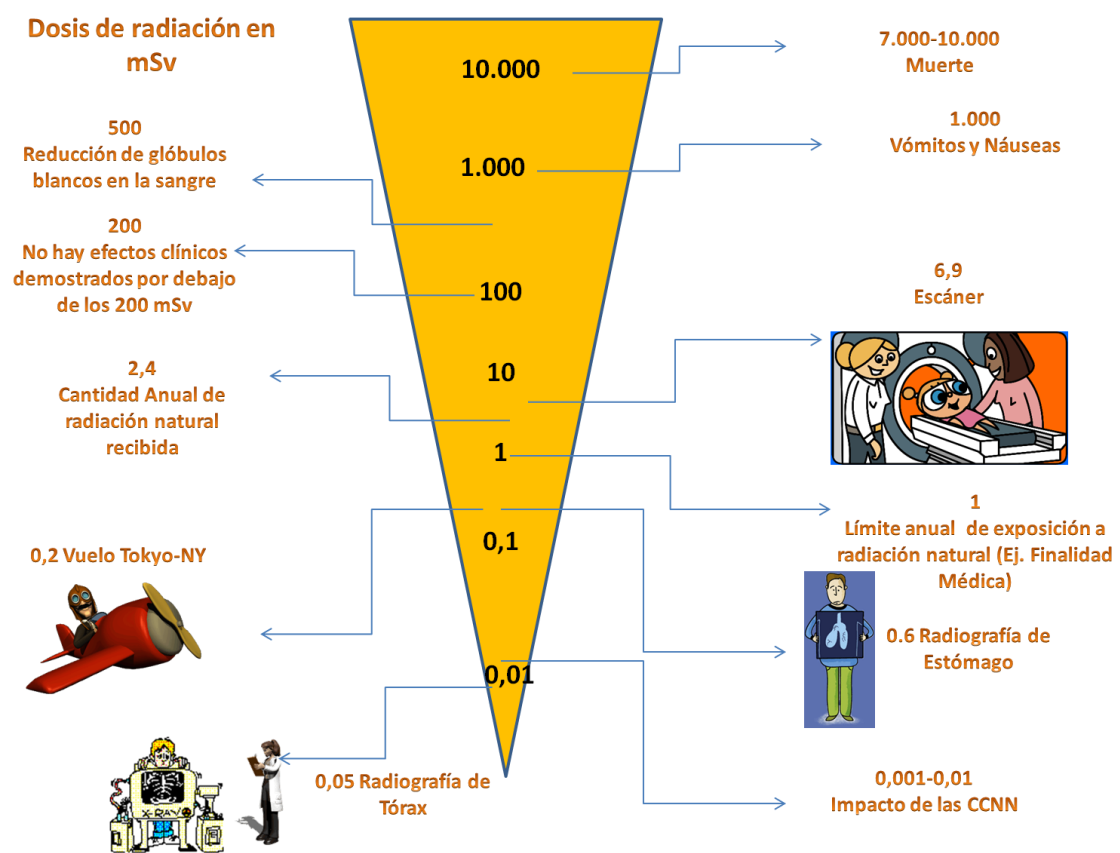
La diferencia entre los dos conceptos radica en que un individuo irradiado por una fuente radiactiva exterior, sufre en sus tejidos los efectos biológicos de la radiación mientras se mantenga próximo a ella, y bastará con que se aleje una distancia suficiente para que deje de ser irradiado. Por el contrario, un individuo contaminado continuará siendo irradiado hasta que

no cese la contaminación, actuando él mismo como fuente de contaminación o de irradiación de otras personas.

Efecto de la dosis recibida en humanos

En la figura 5 se puede observar un resumen de dosis de radiación ionizante que se reciben en distintas actividades (radiografía de tórax, escáner, radiación natural) y también de las dosis que pueden producir efectos en nuestra salud y en la tabla 2 se presentan los efectos biológicos en función de la dosis absorbida, mientras que la tabla 3 los muestra en función de la dosis equivalente.

Figura 5. Efectos sobre la salud de las distintas dosis de radiación ionizante



Fuente: Rincón educativo. Foro nuclear

http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/5efectos_biologicos_de_la_radiacion_ionizante.html (12/01/2016)

CC 2.5

Tabla 2. Efectos biológicos en función de la dosis absorbida

DOSIS ABSORBIDA	EFFECTOS
> 100 Gy	Muerte del individuo en un breve plazo de tiempo, entre algunas horas y unos días, ya que se producen lesiones en el Sistema Nervioso Central.
10-50 Gy	Fallecimiento entre una y dos semanas después de la irradiación, debido a lesiones gastrointestinales.
5-10 Gy	Inflamación, eritemas y descamación seca o húmeda de la piel.
3-5 Gy	Fallecimiento de la mitad de las personas irradiadas en un plazo de uno a dos meses, ya que afectan a la médula ósea, productora de las células sanguíneas.
< 3 Gy	Alteraciones en diversos órganos y tejidos, que van seguidas de reparación y cicatrización, lo que puede dar lugar a su recuperación total o parcial. Debe mencionarse que en el caso de los testículos, con una dosis de 2 Gy puede producirse una esterilidad definitiva y temporal para 0,1 Gy.

Tabla 3. Efectos biológicos en función de la dosis equivalente

DOSIS (mSv)	EFFECTOS SOBRE LA SALUD
10.000	Muerte en días o semanas en el 100% de los casos. Estimación realizado por el Comité científico de las Naciones Unidas para los efectos de la radiación atómica (UNSCEAR) basándose en los supervivientes de las bombas atómicas de Japón.
4.000	Muerte en días o semanas en el 50% de los casos.
500	Límite de seguridad para trabajadores en emergencias según la recomendación de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)
250	No se producen efectos observables de tipo inmediato. Es actual límite de seguridad para trabajadores de emergencias en Japón.
100	No hay evidencia de efectos sobre la salud en seres humanos. Límite de seguridad para las personas que viven cerca de centrales nucleares en situación de emergencia según la ICRP.
3,5	Dosis media anual en España.
3	Exploración radiográfica del aparato digestivo. Un escáner TAC de la cabeza
2,5	Dosis media anual en el mundo. Puede variar entre 1 y 10 mSv dependiendo de la zona.
0,02	Una radiografía de tórax
0,002	3 horas de aviación. Dosis anual media debida a la industria nuclear.

Fuente: Elaboración propia

Efectos en la salud de los radioisótopos Yodo-131 y Cesio-137

¿Cómo son de peligrosos los contaminantes emitidos en los accidentes nucleares? En primer lugar, hay que recordar una cosa: un radioisótopo o es muy radioactivo o es muy duradero en su peligrosidad radiológica, pero ambas cosas no puede ser. La razón es sencilla: si emite mucha energía, también la pierde muy deprisa. Si emite poca, dura mucho pero irradia poco.

Los contaminantes habituales en caso de accidente nuclear son especialmente el yodo-131, el cesio-137, el estroncio-90 y el tecnecio-99. Los que se escapan más fácilmente son los dos primeros, porque dentro del reactor permanecen en estado gaseoso y salen al exterior con la primera fisura de la vasija. El estroncio y el tecnecio, en cambio, tienen un punto de ebullición mucho más alto y se mantienen en estado sólido, con lo que sólo pueden escapar en cantidades significativas si la vasija ha reventado. En Fukushima no se está detectando estroncio y tecnecio fuera de la instalación, pero sí yodo y cesio. Eso significaría que las vasijas afectadas mantuvieron su integridad general, aunque con grietas.

El yodo-131 tiene una semivida muy corta, de 8,02 días. La semivida o periodo de semidesintegración es el tiempo que tarda en decaer la primera mitad de los radionúclidos presentes. Es decir, que a los 8,02 días queda el 50%, a los 16,04 el 25%, a los 24,06 el 12,5% y así sucesivamente. Normalmente se ve expresado como vida media, aunque decirlo así no sea exacto. El yodo-131 tiende a acumularse en la glándula tiroides y no se elimina bien biológicamente. Sin embargo, esa semivida tan corta significa que se elimina a sí mismo rápidamente. Si no se producen nuevas emisiones y absorciones, en 80 días quedará menos del uno por mil.

El yodo-131 emite radiación beta y gamma para transmutar en xenón-131, que es estable. La emisión primaria son rayos gamma de 364 keV y partículas beta de 190 keV, con un máximo de 606 keV. Ha sido vinculado con el cáncer tiroideo, especialmente en la infancia y adolescencia. La vía de entrada al organismo es típicamente mediante la alimentación, sobre todo con el consumo de leche y verduras contaminadas.

Un método de tratamiento común para prevenir la exposición a yodo-131 es saturando la tiroides con yodo-127 regular no radiactivo, con un yoduro o sal de yodato. La tiroides absorberá muy poco del yodo-131 radiactivo después de que este saturada con yodo no radiactivo, por lo tanto evitando el daño causado por la radiación. El método de tratamiento más común es dar yoduro de potasio a aquellas personas en riesgo. La dosis para los adultos es de 130 mg de yoduro de potasio por día, dados en una dosis, o divididos en porciones de 65 mg dos veces al día. Esto es equivalente a 100 mg de yoduro, y esto es aproximadamente 7.000 veces más grande que la dosis nutricional del yoduro, que es 0,015 mg por día (150 microgramos por día).

El cesio es un metal dúctil que funde a 28,4 °C. Su isótopo radioactivo cesio-137 es uno de los subproductos característicos de la fisión y uno de los contaminantes habituales en los accidentes o explosiones nucleares. Suele permanecer en estado gaseoso dentro de los reactores, por lo que escapa con las primeras grietas.

El cesio-137 tiene una semivida mucho más larga, de 30,17 años. Es decir, que le cuesta mucho más tiempo desaparecer del medio ambiente. En el 94,6% de las ocasiones, su cadena de desintegración consta de dos pasos. El primero es una partícula beta de 512 keV que lo transforma en bario-137m. Esta "m" del final significa que ese bario es un isómero metaestable, o sea que está excitado. Para relajarse, necesita emitir radiación gamma y eso es lo que hace exactamente a continuación: radia un rayo gamma de 662 keV y se estabiliza como bario-137 normal.

El cesio-137 no se da en la naturaleza: sólo apareció en la Tierra tras las primeras explosiones nucleares humanas. De hecho, a veces se usa para comprobar si un objeto es anterior a 1945. Se da la circunstancia de que es muy soluble en agua y los seres vivos tenemos mucha agua. A diferencia del yodo-131, no tiende a acumularse en un punto del organismo en particular, sino que se distribuye por todas partes; más en los músculos y menos en los huesos. El cesio-137 entra en el organismo a través del agua, los alimentos y también por inhalación, típicamente al caminar sobre suelo contaminado levantando polvo o manipular objetos contaminados y luego acercarse las manos a la cara. Tiene una semivida biológica de 64 a 110 días; este es el tiempo que el cuerpo necesita para eliminar la mitad por vías naturales.

Las dosis bajas de cesio-137 no se han vinculado a ninguna patología en particular. De los experimentos realizados con animales en el pasado y tras los bombardeos de Hiroshima y Nagasaki se sabe que a dosis superiores incrementa la mortalidad general y tiene efectos teratogénicos sobre la descendencia. Sin embargo, parece que hacen falta dosis ya en el rango de los efectos no-estocásticos para que estos efectos estocásticos se manifiesten también.

Efectos en la salud de las radiaciones del Accidente Nuclear de Fukushima

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, las conclusiones del presente informe concuerdan con las comunicadas por el Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR, siglas en inglés) a la Asamblea General de las Naciones Unidas. El UNSCEAR determinó 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” (señalada en el contexto de las repercusiones en la salud relacionadas con los “niveles y efectos de la exposición a la radiación debida al accidente nuclear tras el sismo y tsunami de gran magnitud ocurridos en la zona oriental del Japón en 2011”). Con respecto al grupo de trabajadores que recibieron dosis efectivas de 100 mSv o superiores, el UNSCEAR concluyó 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”.

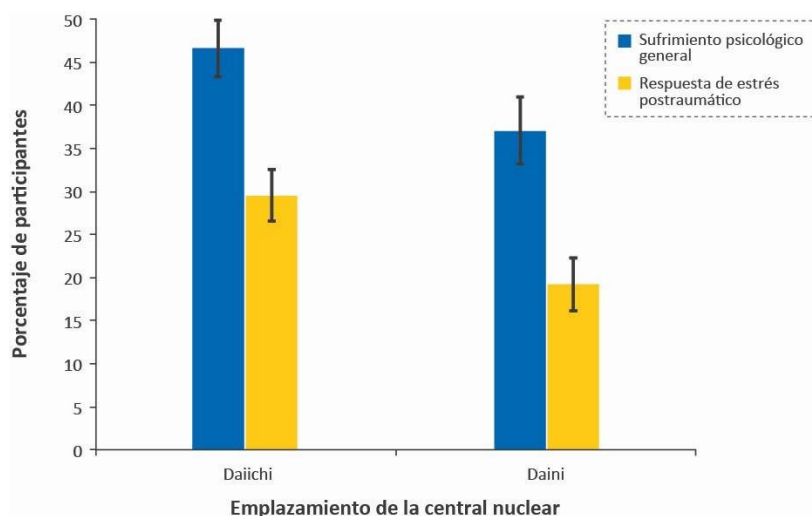
El Estudio sobre la Gestión Sanitaria en Fukushima se emprendió para monitorizar la salud de la población afectada de la prefectura de Fukushima. Este estudio tiene por objeto detectar y tratar precozmente las enfermedades, y también prevenir las enfermedades relacionadas con el modo de vida. Mientras se prepara el presente informe, está en curso una exploración intensiva de la glándula tiroides de los niños en el marco de ese estudio. 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, el UNSCEAR concluyó 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 informó 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. El 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. El UNSCEAR estimó 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”.

Figura 6. Porcentaje de trabajadores de las centrales nucleares de Fukushima Daiichi y Fukushima Daini que comunicaron síntomas de sufrimiento psicológico, abril de 2011



Fuente: Informe del director General. IAEA.

Este contenido queda fuera de nuestra licencia creative commons.

Efectos sobre la biota no humana del Accidente Nuclear de Fukushima

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.

Las dosis absorbidas estimadas alcanzaron sus valores más altos para las plantas en las primeras semanas después del accidente, pero se mantuvieron por debajo de los niveles en que cabría prever efectos agudos. En el caso de algunos organismos de referencia terrestres (como el pino, la hierba, el ciervo y la rata) se superaron los niveles de referencia pertinentes en la primera fase después del accidente. Sin embargo, no se ha observado ningún efecto general en las poblaciones de estos organismos ni en los ecosistemas.

Aunque las tasas de dosis superaron algunos de los valores de referencia en las primeras fases del accidente, no se prevé ningún efecto en las poblaciones de animales y plantas ni en los ecosistemas. Tampoco se prevén efectos a largo plazo, puesto que las estimaciones de las dosis a corto plazo fueron en general muy inferiores a los niveles en que cabría prever efectos perjudiciales agudos, y las tasas de dosis disminuyeron con relativa rapidez después del accidente.

4.3 Consecuencias radiológicas del accidente.

Introducción

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.

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. La presencia y la actividad de los radionucleidos depositados en el medio ambiente terrestre se monitorizaron y caracterizaron. 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.

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.

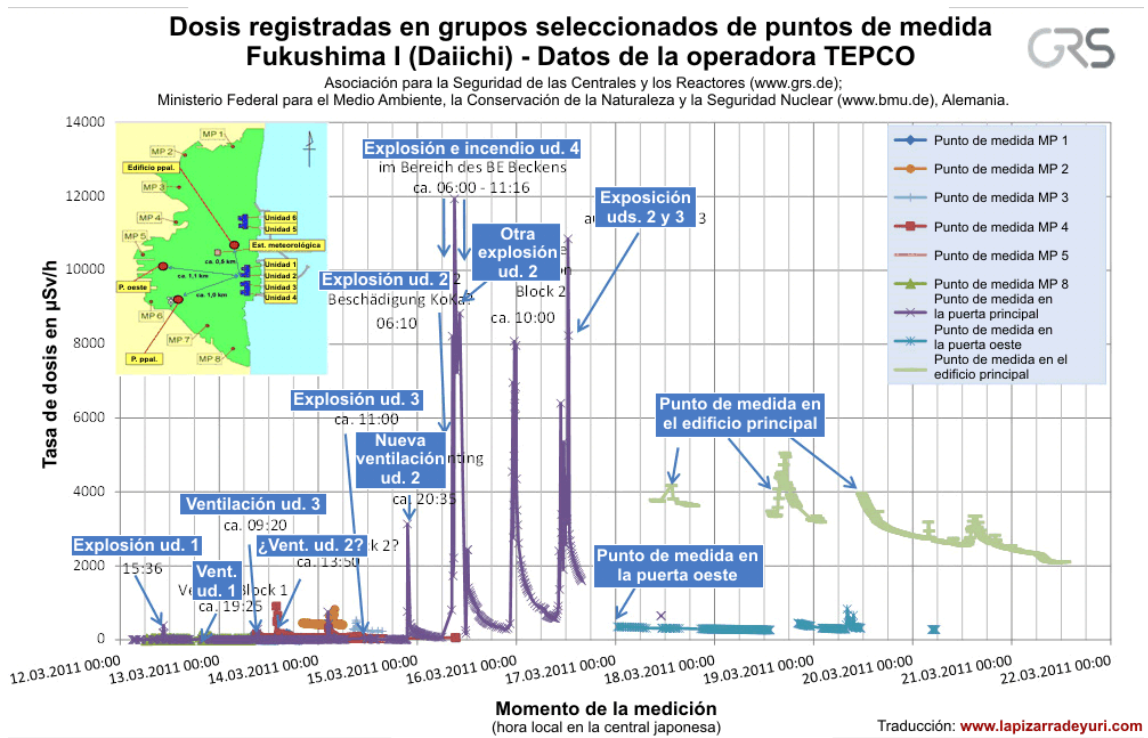
Algunos radionucleidos emitidos, como el yodo-131, el cesio-134 y el cesio-137C, fueron encontrados en el agua potable, en alimentos y en algunos productos no comestibles. En respuesta al accidente, las autoridades japonesas establecieron restricciones para evitar el consumo de estos productos.

Emisiones a la atmósfera

En la primera fase del accidente, los gases nobles kriptón-85 y xenón-133, 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 yodo-131, que es de corta duración contribuyó a las dosis equivalentes recibidas en la glándula tiroides, cuando hubo ingestión o inhalación. El cesio-134 y cesio-137, 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 yodo-131 decae con relativa rapidez, puede dar lugar a dosis equivalentes relativamente altas en la glándula tiroides. En algunas zonas, el cesio-137 puede permanecer en el medio ambiente y, en ausencia de medidas de restauración, podría seguir contribuyendo a las dosis efectivas recibidas por las personas.

También se emitieron radionucleidos del estroncio, el rutenio y algunos actínidos (como el plutonio) en cantidades variables. Entre las 5.30 y las 10.50 horas del 13 de marzo se detectaron neutrones cerca de la entrada principal de la central (situada a aproximadamente 1 km de las Unidades 1 a 3). Se estima que los neutrones se generaron por fisión nuclear espontánea de radionucleidos que pueden haberse emitido como consecuencia del daño sufrido por el núcleo del reactor. Este fenómeno era previsible, y se ha notificado la presencia de esos radionucleidos en niveles relativamente bajos.

Figura 7. Dosis registradas en puntos de medida en Fukushima Dai-ichi



Fuente: Ministerio Medio Ambiente de Alemania con datos de TEPCO. Traducido por "La pizarra de Yuri"
<http://www.lapizarra deyuri.com/2011/03/17/mediciones-de-radioactividad-en-japon-y-el-entorno-de-fukushima-i-el-16032011>
(19/05/2016)

Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.

Se estima que se emitieron entre 6000 y 12 000 PBq de Xenón-133 (o entre 500 y 15 000 PBq, si se incluyen las primeras estimaciones). La actividad total media del yodo-131 emitido fue de entre 100 y 400 PBq (entre 90 y 700 PBq según primeras estimaciones) y la del cesio-137 de entre 7 y 20 PBq (entre 7 y 50 PBq según primeras estimaciones). La mayor parte de las emisiones se dispersaron por el océano Pacífico Norte y 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.

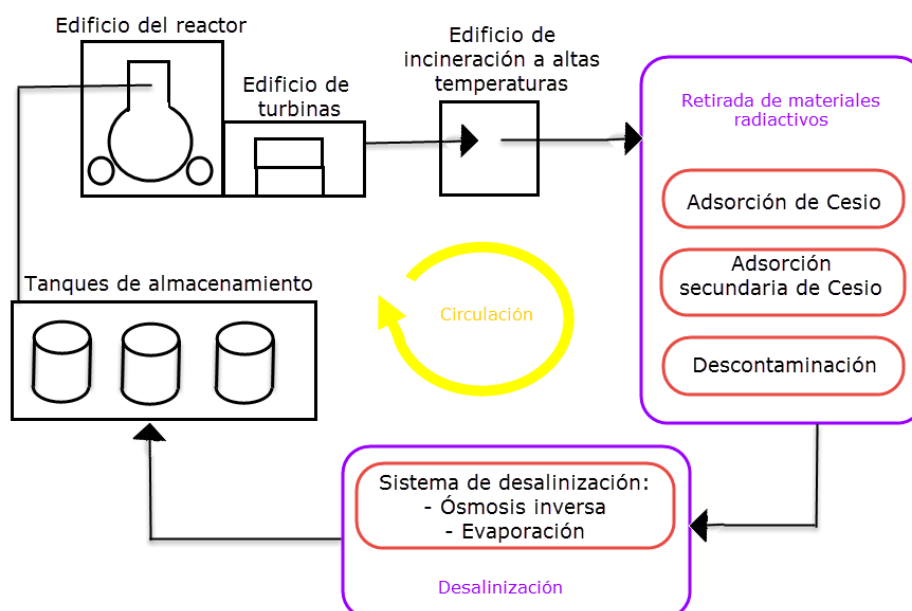
Emisiones al mar

La mayor parte de las emisiones atmosféricas que se dispersaron por el Pacífico Norte se depositaron en la capa superficial del océano. Hubo emisiones directas, y también descargas en el mar frente al emplazamiento. La principal fuente de agua altamente radiactiva fue una zanja de la central nuclear. Las emisiones radiactivas más altas se observaron a comienzos de abril de 2011. Las emisiones y descargas directas de yodo-131 al mar se estimaron en 10 a 20 PBq. Las emisiones y descargas directas de cesio-137 se estimaron en valores de entre 1 y 6 PBq, en la mayoría de los análisis.

El agua contaminada del reactor U2 con 4.700 TBq de actividad se fugó hacia el mar a principios de abril de 2011. Hubo también liberaciones deliberadas en esas mismas fechas de alrededor de 10.400 m³ de agua con poca contaminación. El propósito de esta liberación fue liberar espacio para almacenar agua con más contaminación y permitir condiciones de trabajo más seguras. NISA confirmó que no hubo cambios observables en los niveles de radioactividad en el mar como resultado de dicha descarga, que acumulaba 0.15 TBq. En mayo de 2011, se fugó 250 m³ de agua contaminada con 20 TBq del reactor n° 3 pero pudo ser contenida cerca de la planta.

Grandes cantidades de agua contaminada se acumularon por la premura que suponía enfriar los reactores (mucho de ella era de mar como se comentó con anterioridad). Se trabajó en la instalación de capacidad adicional de tratamiento para procesar y reciclar mucha de esa agua. En la figura 8 se describe el proceso de descontaminación del agua.

Figura 8. Sistema de tratamiento del agua contaminada.



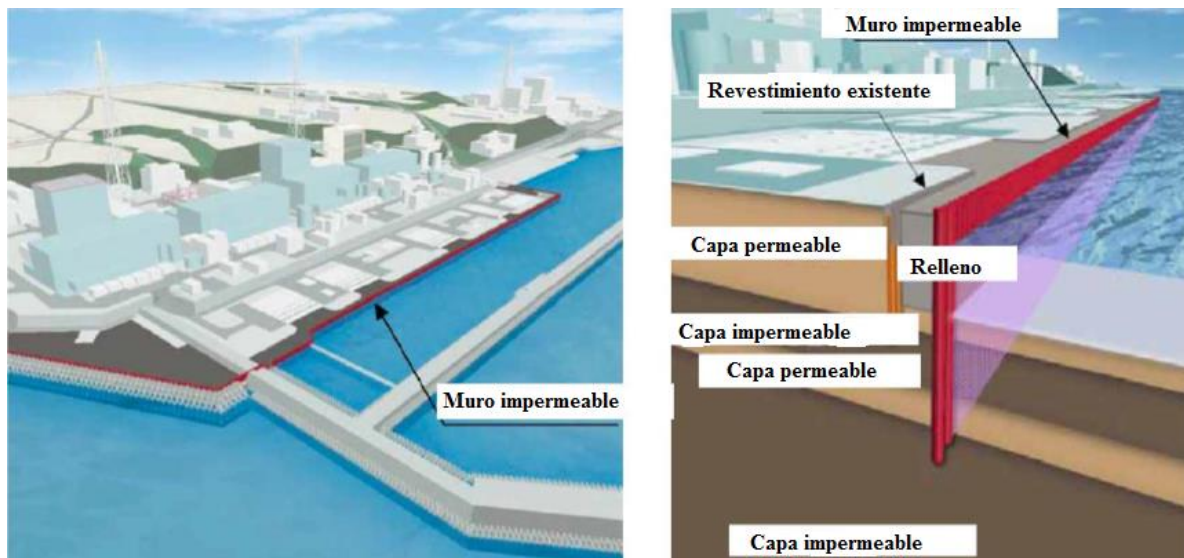
Fuente: Elaboración propia con datos de TEPCO.

El objetivo de ese tratamiento es bajar los niveles de contaminación radiactiva de esa agua para poder devolverla al mar o para volver a enfriar los reactores con el agua tratada. El tratamiento

es diferente si se reutiliza o si se vierte al mar. Si se vierte al mar, el tratamiento suele consistir en descontaminación (absorción de los contaminantes radiactivos más peligrosos como el cesio) si es para reutilizarla, además de la descontaminación radiactiva, se realiza la desalación (bien por osmosis inversa o por evaporación).

Así mismo, se han construido barreras impermeables (figura 9) para impedir las fugas de agua hacia el mar:

Figura 9. Barreras impermeables para impedir fugas de agua al mar



Fuente: TEPCO (Traducida)
<http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/water/13070801-e.html> (19/05/2016)
Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.

Según un informe conjunto de la OMS (Organización Mundial de la Salud) y la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) de las Naciones Unidas publicado en mayo de 2012, los isótopos con mayor vida media detectados en el entorno marino han sido el cesio-134, con vida media de 2 años y el cesio-137 con vida media de 30 años. Del yodo detectado inicialmente no quedan rastros por su vida media corta. Los cesios pueden ser transportados a través de largas distancias por las corrientes marinas, principalmente en dirección al este de Japón; sin embargo, se espera que las grandes cantidades de agua del océano Pacífico rápidamente dispersen y diluyan esos materiales radiactivos.

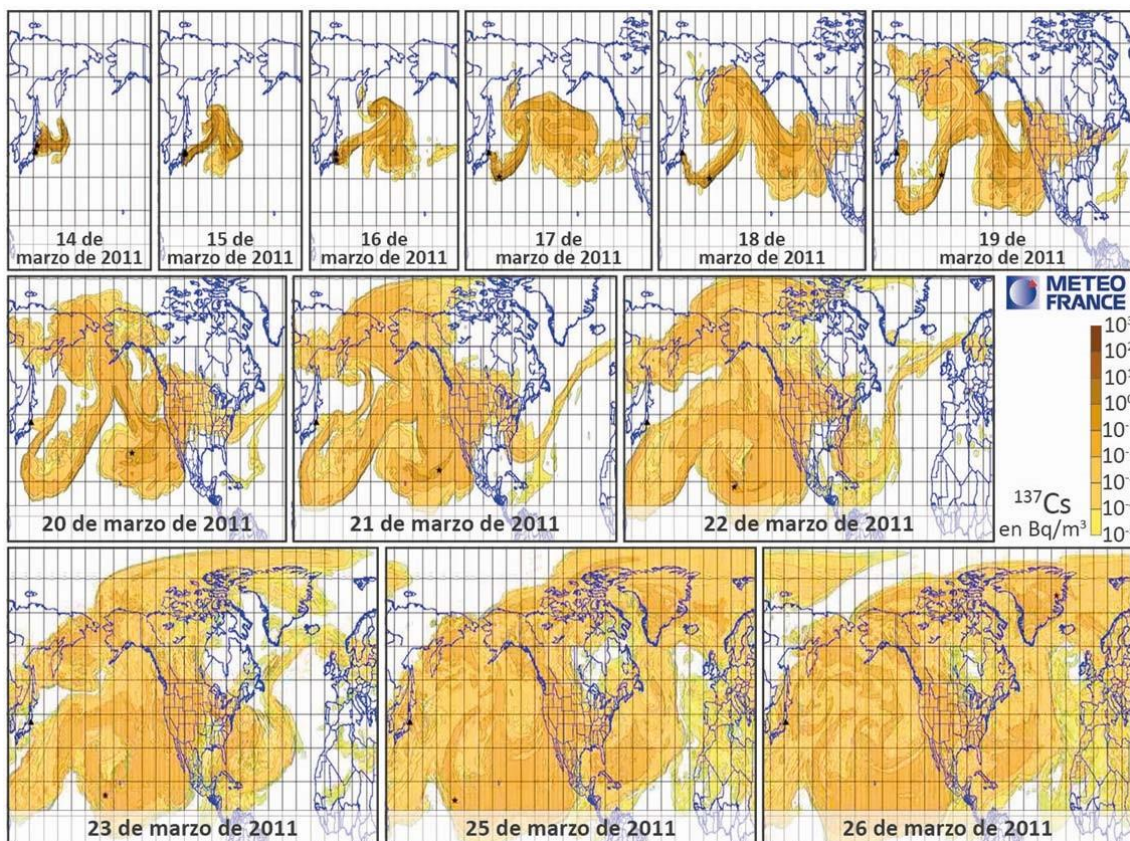
Se informó también que pruebas de agua marina a 30 km de la costa de Japón han mostrado que las concentraciones de radionúclidos han decaído rápidamente a niveles muy bajos.

Dispersión de la radiación

El transporte de las emisiones atmosféricas radiactivas fue principalmente hacia el norte y el este del Japón, siguiendo la dirección de los vientos dominantes, y luego alrededor del globo.

En las figura 10 y 11 se puede observar el resultado de un modelo de dispersión atmosférica y marina respectivamente, del cesio-137, en la que se puede corroborar la conclusión de que la concentración de actividad en la atmósfera disminuyó notablemente con la distancia de la central nuclear de Fukushima Dai-ichi.

Figura 10. Dispersión atmosférica del cesio-137



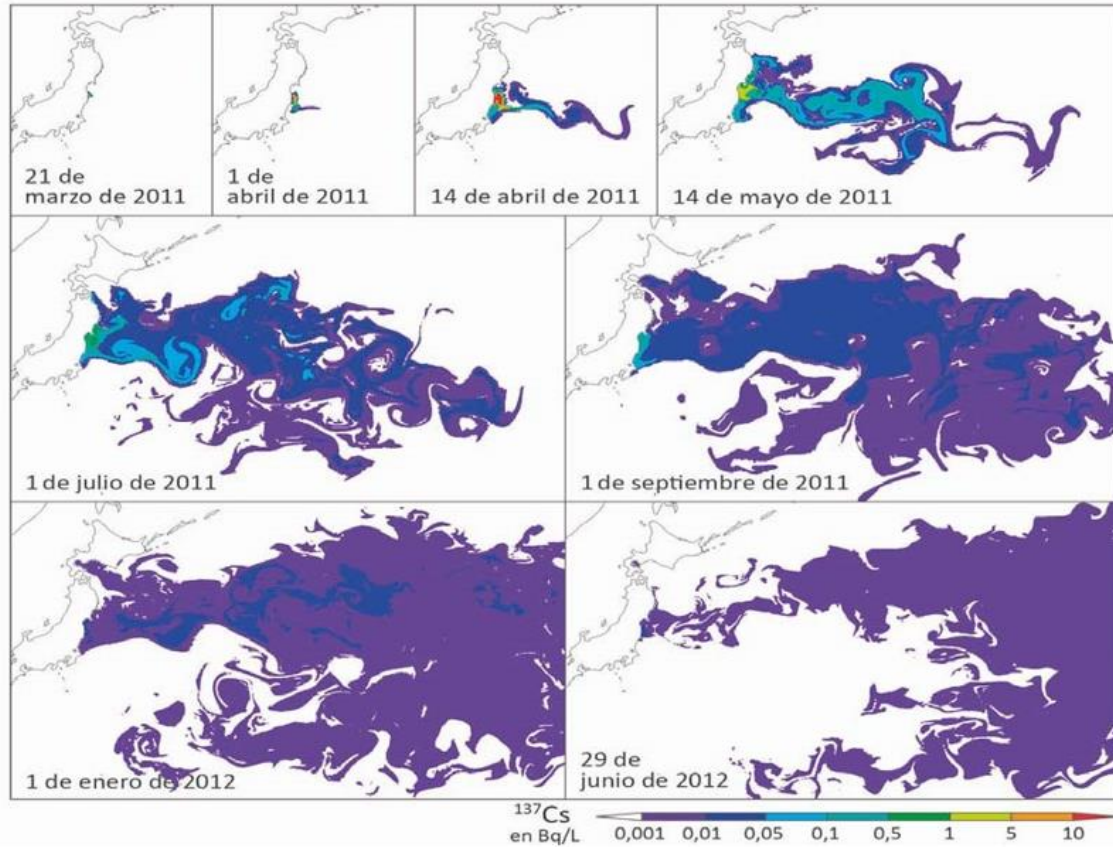
Fuente: IAEA. Informe del Director general
Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.

Redes de monitorización radiológica de alta sensibilidad detectaron niveles extremadamente bajos de radiactividad atribuible al accidente incluso en Europa y América del Norte. Pero los efectos de estas emisiones en el nivel de radiactividad medioambiental de fondo en el mundo fueron insignificantes.

La mayoría de los radionucleidos emitidos y descargados en el mar frente al emplazamiento fueron transportados hacia el este con la corriente de Kuroshio, se desplazaron por grandes distancias en el giro del Pacífico Norte y quedaron muy diluidos en el agua del mar. La radiactividad se propagó por grandes distancias oceánicas y fue detectada en cantidades ínfimas

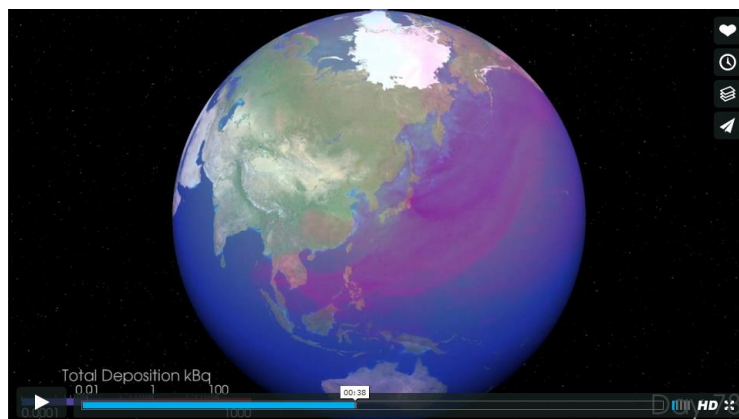
muy lejos del accidente, en algunos casos por vías que pasaban por la biota oceánica, por ejemplo el atún de aleta azul.

Figura 11. Dispersión marina del cesio-137



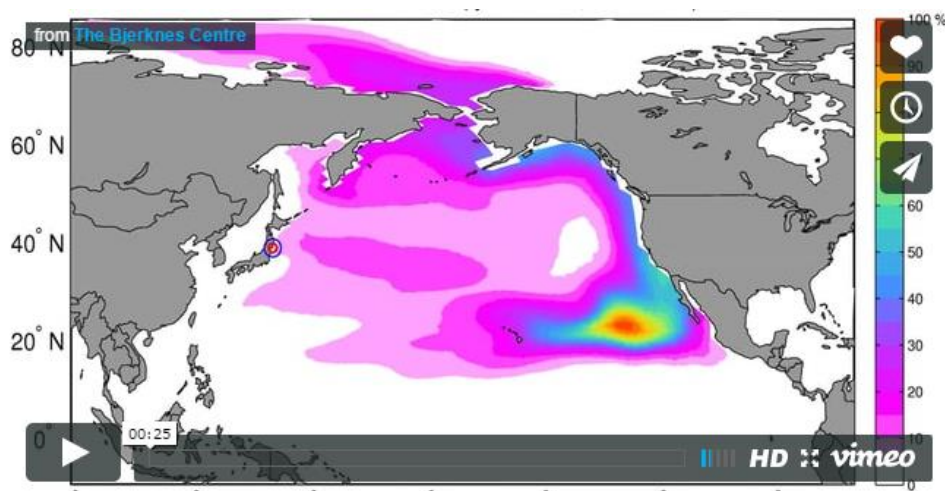
Fuente: IAEA. Informe del Director general
Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.

En el siguiente vídeo podemos ver una simulación de la dispersión del cesio-137 en los primeros 80 días.



Vídeo: <https://vimeo.com/61343486>

Recientemente (febrero del 2016), se ha publicado una nueva simulación de la dispersión marina del cesio-137, en esta ocasión, con un horizonte de 20 años.



Vídeo: <https://vimeo.com/154848094>

Deposición de la radiación

La actividad depositada en la superficie de la Tierra se cuantifica como densidad de deposición y se mide en términos de la actividad por unidad de superficie, expresada generalmente en Bq/m². Cuando la deposición es terrestre, se suele denominar contaminación terrestre.

Es difícil presentar una estimación exacta de la cantidad de cesio-137 emitido a la atmósfera que se depositó en la superficie del océano. Como referencia, se estima que la deposición global de cesio-137 antes del accidente, en 1970, era de aproximadamente 290 PBq y el nivel típico (de fondo) del cesio-137 en el océano Pacífico Norte era de aproximadamente 69 PBq.

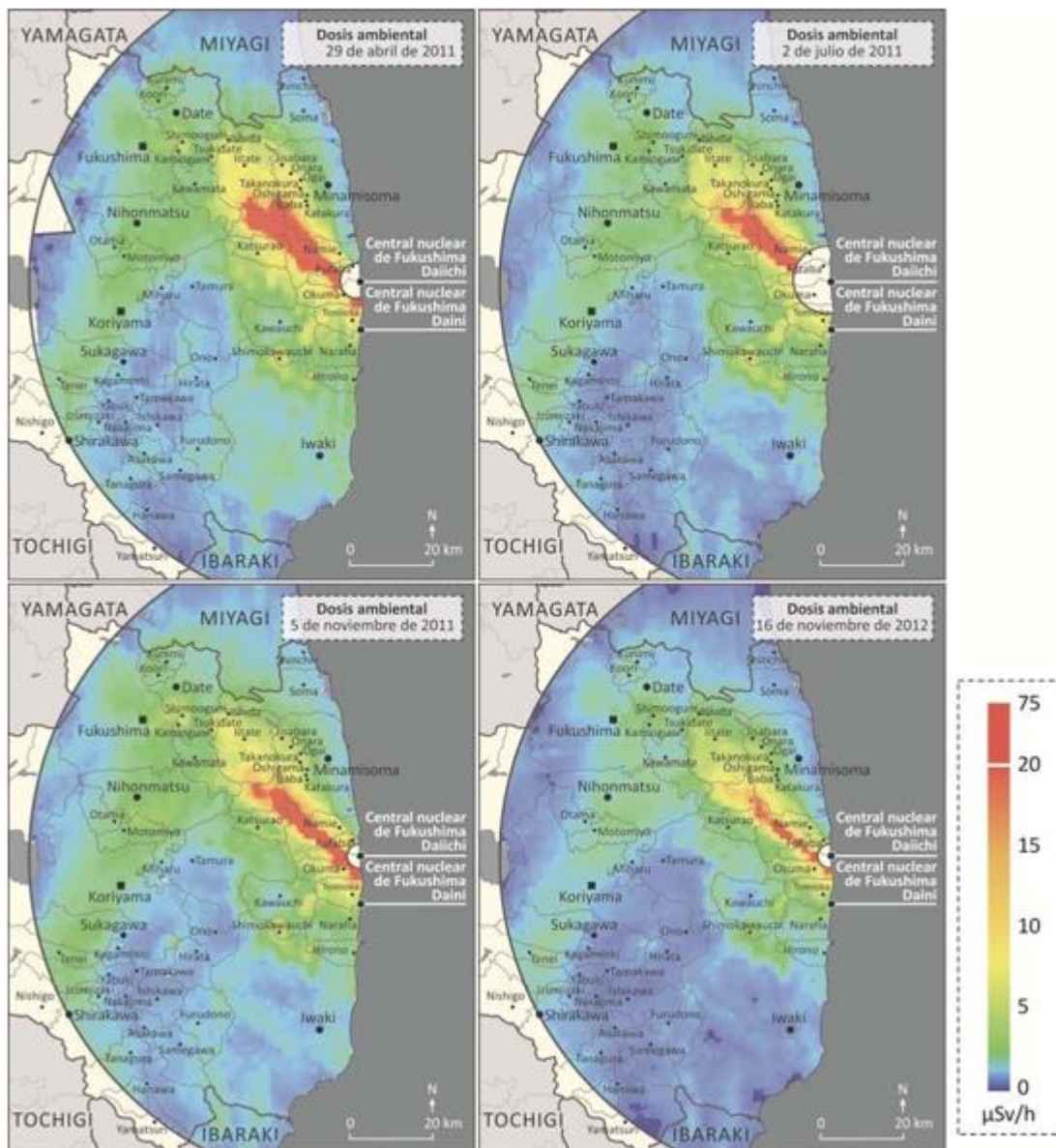
Aunque la mayoría de las emisiones atmosféricas se dispersaron hacia el este, las que se produjeron el 12, 14 y 15 de marzo fueron transportadas por el viento tierra adentro, y los radionucleidos correspondientes, en particular el yodo-131, el cesio-134 y el cesio-137, se depositaron sobre el suelo. Los patrones de deposición variaron considerablemente, dependiendo en gran medida de las lluvias, las nevadas y otras condiciones locales o regionales, como la topografía y el uso de la tierra. Otro factor que influyó en el patrón de deposición en el medio ambiente terrestre fueron las diferentes características físicas y químicas del yodo y el cesio.

Los mayores depósitos de larga duración de cesio-137 se encontraron al noroeste de la central nuclear de Fukushima Daiichi, donde se estimó que la deposición total de cesio-137 en la superficie terrestre de Japón había sido de unos 2 a 3 PBq. La densidad de deposición se reduce con el tiempo a causa del decaimiento físico y ambiental. El cesio se puede desplazar con relativa facilidad en el medio ambiente debido a la solubilidad de sus compuestos. Los efectos de meteorización, como los provocados por el viento y la lluvia, y otros efectos ambientales pueden

reducir la presencia del cesio en el medio ambiente. Todos estos efectos reducen la presencia de cesio-137 en un tiempo más breve que su período de semidesintegración. En muchas zonas afectadas, el cesio-137 ha disminuido aún más gracias a las limpiezas y otros trabajos de restauración.

En la figura 12 podemos ver la 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.

Figura 12. Tasa de dosis equivalente ambiental medida desde el aire.



Fuente: IAEA. Informe del Director general.
Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.

Los niveles más altos de yodo-131 depositado superaron los 3 millones de Bq/m² inmediatamente después del accidente, pero, debido al breve período de semidesintegración del yodo-131, su presencia disminuyó rápidamente y ya no es mensurable.

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 y 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 indicaron 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.

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.

Dentro de la central nuclear, hasta el 29 de junio, alrededor de 115 personas fueron expuestas a niveles de radiación de entre 100 y 250 mSv, y 9 adicionales probablemente recibieron dosis por encima de 250 mSv debido a la inhalación de gases de yodo-131. Durante el día se encontraban aproximadamente 200 trabajadores en la central y a la fecha unos 3.500 trabajadores de un total de 3.700 habían recibido revisiones internas de exposición a la radiación. El límite de dosis para trabajadores en condiciones normales era de 100 mSv/año, pero dadas las condiciones del accidente, las autoridades japonesas decidieron fijar un límite de dosis efectiva de 250 mSv durante el período del mismo. La dosis de corto plazo aceptada internacionalmente para trabajadores en condiciones de emergencias que estén llevando a cabo acciones para salvar vidas es de 500 mSv. Estas dosis aunque significativas, no provocan ningún daño físico inmediato aun cuando a largo plazo pueden significar un ligero incremento en la posibilidad de contraer alguna enfermedad.

Tres trabajadores sufrieron quemaduras de radiación en pies y piernas por exposición inadvertida a agua altamente contaminada en el sótano del edificio de turbinas. Estas personas fueron dadas de alta del hospital después de haber sido examinadas durante 4 días sin probabilidad alguna de que tengan consecuencias a largo plazo. También, como se dio a conocer en la prensa en los inicios del accidente, dos trabajadores murieron en la etapa inicial del mismo

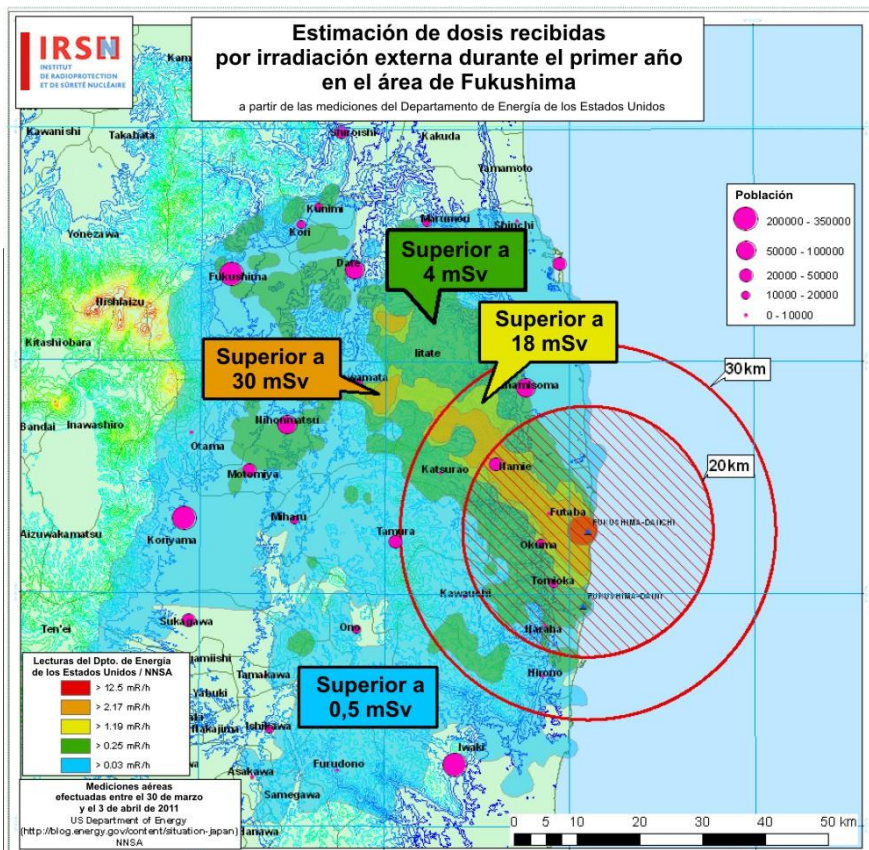
y otro más murió el 14 de mayo de 2011, todos ellos por causas no relacionadas con exposición a la radiación.

Al mes de diciembre de 2011, habían participado en operaciones de emergencia alrededor de 23000 trabajadores de emergencias. Las dosis efectivas de radiación que había recibido la mayoría de ellos estaban por debajo de los límites de dosis ocupacionales vigentes en el Japón. De esas personas, 174 superaban el criterio inicial para los trabajadores de emergencias, y 6 superaban 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.

Como resultado de las emisiones de radiación de la planta, el 4 de abril de 2011 se registraron niveles de 0.06 mSv/día en la ciudad de Fukushima a 65 km de la planta, 60 veces más alto de lo normal pero dentro de los límites establecidos por las autoridades. El límite de seguridad establecido por el gobierno central a mediados de abril de 2011 para áreas públicas era de 0.09 mSv/día.

Cálculos hechos mediante el análisis de datos a finales de mayo de 2011 demostraron que en un área de 500 km² dentro del área de exclusión de 20 km, y en otra área de tamaño similar al noroeste de la planta (áreas consideradas con la mayor cantidad de contaminación) presentarían dosis anuales de 20 mSv hasta un año después del accidente. Esto coincide con estimaciones hechas por el Instituto de Radioprotección y Seguridad Nuclear (ISRN) de Francia que indican que es improbable que las dosis externas máximas para la población viviendo en los alrededores de la planta sobrepasen los 30 mSv/año en el primer año después del accidente. El nivel de dosis de fondo en la región es en promedio de 2-3 mSv/año, y llega a ser de hasta 50 mSv/año en algunos sitios.

Figura 13. Estimación de dosis recibidas por irradiación externa durante el primer año



Fuente: ISRN. Traducción por "La pizarra de Yuri"
<http://www.lapizarradeyuri.com/2011/04/14/fukushima-ines-7/> (19/05/2016)
Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.

En cuanto al público de las inmediaciones, no se han encontrado consecuencias para la salud al monitorear a 195345 residentes viviendo en la vecindad de la planta hasta finales de mayo de 2011. Un total de 1080 niños sometidos a pruebas de exposición en glándula tiroides resultaron estar dentro de los límites seguros de acuerdo con el informe del AIEA de junio mencionado.

4.4 Medidas de protección radiológica.

Introducción

Las radiaciones ionizantes tienen múltiples aplicaciones beneficiosas para el hombre, pero si son utilizadas inadecuadamente pueden producir efectos perjudiciales en la salud de las personas y en el medio ambiente. Por ello es necesario disponer de un sistema de protección radiológica, que regule el uso de las radiaciones ionizantes.

Distinguiamos entre irradiación y contaminación:

Se denomina irradiación o exposición, a la acción de someter a una persona u objeto a las radiaciones ionizantes. Cuando la fuente de radiación se encuentra fuera del individuo se habla de irradiación externa.

Figura 14. Ejemplo de irradiación solar (no ionizante)



Fuente: Petr Kratochvil
https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AGirl_Sunbathing.jpg (19/05/2016)
Dominio Público

Se denomina contaminación, cuando una sustancia radiactiva no deseada se deposita en la superficie del cuerpo o es incorporada en él. Si las sustancias radiactivas se depositan sobre la piel del individuo se trata de una contaminación externa, mientras que si se incorporan en el organismo por ingestión, inhalación o a través de heridas, se produce una contaminación interna. En este caso, las sustancias radiactivas se comportan en el interior del organismo como fuentes de radiación, es decir producen irradiación de los tejidos u órganos en los que se depositen.

Figura 15. Ejemplo de contaminación externa no radiactiva



Fuente: David K
[https://en.wikipedia.org/wiki/File:First_Rain_\(228226305\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:First_Rain_(228226305).jpg) (14/01/2016)
CC AT SA 2.0

Protección radiológica

La **protección radiológica** es el conjunto de medidas establecidas por los organismos competentes para la utilización segura de las radiaciones ionizantes y garantizar la protección de los individuos, de sus descendientes, de la población en su conjunto, así como del medio ambiente, frente a los posibles riesgos que se deriven de la exposición a las radiaciones ionizantes.

La protección radiológica tiene un doble objetivo: proteger a las personas y el medio ambiente de los efectos nocivos de la radiación, pero sin limitar indebidamente las prácticas que, dando lugar a exposición a las radiaciones, suponen un beneficio para la sociedad o sus individuos.

Para conseguir cumplir el objetivo fundamental de la protección radiológica se establecen tres principios básicos:

- **Justificación:** Toda actividad que pueda incrementar la exposición a radiaciones ionizantes debe producir el suficiente beneficio a los individuos expuestos o a la sociedad como para compensar el perjuicio debido a la exposición a la radiación.
- **Optimización:** Para cualquier fuente de radiación, las dosis individuales, el número de personas expuestas, y la probabilidad de verse expuestas, deben mantenerse tan bajas como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta consideraciones sociales y económicas
- **Limitación de dosis:** La exposición individual al conjunto de las fuentes de radiación susceptibles de control, ha de estar sujeta a límites en la dosis recibida y, en el caso de exposiciones potenciales, a cierto control del riesgo. Estos límites son diferentes para el público y para los trabajadores profesionalmente expuestos. Una persona se considera profesionalmente expuesta si como consecuencia de su actividad laboral, está expuesta

a radiaciones ionizantes con una probabilidad de recibir 1/10 de los límites de dosis. El resto de las personas se consideran miembros del público.

Tabla 4. Límites de dosis para trabajadores y público.

Miembros del público	
Límite de dosis efectiva (año oficial)	1 mSv
Límite de dosis equivalente (año oficial)	
Cristalino	15 mSv
Piel	50 mSv
Extremidades	50 mSv
Trabajadores expuestos	
Límite de dosis efectiva	
Periodo de 5 años consecutivos	100 mSv
Año oficial	50 mSv
Límite de dosis equivalente (año oficial)	
Cristalino	150 mSv
Piel	500 mSv
Extremidades	500 mSv

La protección radiológica considera que existen tres situaciones de exposición posibles:

- Situaciones de *exposición planificada* que son aquéllas que involucran la introducción y la operación planificada de fuentes.
- Situaciones de *exposición de emergencia* que son situaciones inesperadas, que demandan una atención urgente, como las que pueden sobrevenir durante la operación de una situación planificada (accidente) o de un acto malévolo.
- Situaciones de *exposición existente* que son estados de exposición que existen cuando tiene que ser tomada una decisión sobre su control, como las causadas por la radiación de fondo natural (radón).

A cada una de ellas se aplican los principios fundamentales de la justificación y la optimización de la protección. Los límites de dosis (individual) se aplican a las situaciones de exposición planificada, pero no se aplican a situaciones de emergencia. En estas últimas existen unos niveles de dosis de referencia.

La dosis de radiación recibida por un individuo al permanecer en las proximidades de una fuente de radiación, depende de tres factores:

- Distancia entre la fuente de radiación y el individuo: la dosis recibida disminuye proporcionalmente según aumente la distancia entre fuente e individuo.
- Tiempo de permanencia: la dosis recibida aumenta a mayor tiempo de exposición a la radiación.
- Blindaje interpuesto entre la fuente de radiación y el individuo: el blindaje tiene por misión reducir la exposición a las radiaciones ionizantes en las personas situadas en las

proximidades de una fuente radiactiva. El tipo de blindaje depende del tipo de radiación y de su energía.

Protección de los trabajadores

Como se ha comentado anteriormente, uno de los principios básicos de la protección radiológica es la limitación de dosis. En el caso de los trabajadores, el límite de dosis efectiva es de 20 mSv al año, pudiéndose promediar en cinco años consecutivos, es decir en esos cinco años se podrá recibir un total de 100 mSv, siempre y cuando en un año no se superen los 50 mSv. Existen límites de dosis equivalente para tejidos u órganos concretos: cristalino (150 mSv al año), piel (500 mSv al año; límite que se aplica a la dosis promediada sobre cualquier superficie de 1 cm², con independencia de la zona expuesta) y manos, antebrazos, pies y tobillos (500 mSv al año).

Para poner en práctica la protección radiológica de los trabajadores, hay que establecer medidas de control y vigilancia para prevenir su exposición a radiaciones ionizantes y que no se superen los límites de dosis antes mencionados. Entre estas medidas se encuentran:

- Evaluar las condiciones laborales.
- Clasificar y señalar los lugares de trabajo según la cantidad de radiación que pueda existir.
- Clasificar a los trabajadores en diferentes categorías según sus condiciones de trabajo.
- Realizar una vigilancia radiológica de los trabajadores profesionalmente expuestos, mediante dosímetros.
- Establecer programas de información y formación en protección radiológica.
- Aplicar las normas y medidas de vigilancia y control de las diferentes zonas
- Hacer una vigilancia médica periódica por servicios de prevención autorizados.

Delimitación de las zonas dentro de las instalaciones radiactivas

Según la forma en que se pueda producir la exposición a radiación en los trabajadores (irradiación externa, contaminación o ambas), las zonas de trabajo se clasifican en:

- **Zona vigilada.** Es aquella zona en la que existe la posibilidad de recibir dosis efectivas superiores a 1 mSv por año oficial o una dosis equivalente superior a 1/10 de los límites de dosis equivalentes para el cristalino (150 mSv), la piel y las extremidades (500 mSv).
- **Zona controlada.** Es aquella zona en la que: (1) Existe la posibilidad de recibir dosis efectivas superiores a 6 mSv por año oficial o una dosis equivalente superior a 3/10 de los límites e dosis equivalentes para el cristalino (150 mSv), la piel y las extremidades (500 mSv), o (2) Es necesario seguir procedimientos de trabajo con objeto de restringir la exposición a la radiación ionizante, evitar la dispersión de contaminación radiactiva o

prevenir o limitar la probabilidad y magnitud de accidentes radiológicos o sus consecuencias.

Figura 16. Simbología de las zonas en instalaciones radiactivas



Fuente: Rincón educativo. Foro Nuclear
<http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/zonas.jpg> (15/01/2016)
CC 2.0

Las zonas controladas se podrán subdividir en:

- **Zonas de permanencia limitada:** son aquéllas en las que existe el riesgo de recibir una dosis superior a los límites de dosis (100 mSv durante todo período de cinco años oficiales consecutivos, sujeto a una dosis efectiva máxima de 50 mSv en cualquier año oficial).
- **Zonas de permanencia reglamentada:** son aquéllas en las que existe el riesgo de recibir en cortos períodos de tiempo una dosis superior a los límites de dosis y que requieren prescripciones especiales desde el punto de vista de la optimización.
- **Zonas de acceso prohibido:** son aquéllas en las que existe el riesgo de recibir, en una exposición única, dosis superiores a los límites de dosis.

La clasificación de los lugares de trabajo en las zonas establecidas deberá estar siempre actualizada de acuerdo con las condiciones reales existentes, por lo que será revisada si existieran variaciones de las condiciones de trabajo.

Para combatir el peligro de contaminación en las zonas susceptibles de ello se utilizan vestuarios (figura 17). En los vestuarios se debe cambiar la ropa de calle a la pertinente indumentaria para el trabajo antes de entrar en la zona controlada dosimétricamente. Al finalizar se debe desvestirse siempre siguiendo un procedimiento que evita el arrastre de la contaminación que pudiera haberse adherido a la ropa.

Por último, si los detectores de barrera detectan contaminación, las instalaciones están dotadas de duchas que se utilizan como última medida de descontaminación. Lo más importante es que las barreras no pueden ser traspasadas hasta que los detectores no den como bueno el chequeo del individuo.

Figura 17. Vestuarios en instalaciones radiactivas



Fuente: Curso básico Ciencia y Tecnología Nuclear. Jóvenes Nucleares. Sociedad Nuclear Española
Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.

Protección de las personas

Al igual que en el caso de los trabajadores, existen unos límites de dosis para el público que no pueden superarse por ley. El límite de dosis efectiva para el público es de 1 mSv al año, siendo los límites de dosis equivalentes para cristalino de 15 mSv al año y para la piel de 50 mSv al año (este límite se aplicará a la dosis promediada sobre cualquier superficie cutánea de 1 cm², con independencia de la superficie expuesta).

Es importante saber que en los límites de dosis, tanto de trabajadores como del público, no se incluyen las dosis recibidas de la radiación natural de fondo, ni aquellas que puedan recibirse como consecuencia de tratamientos médicos.

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) mantiene un estricto programa de vigilancia de todas y cada una de las instalaciones radiactivas y nucleares que existen en España, para garantizar que el funcionamiento de las mismas sea seguro para el público y los trabajadores.

En España existen diversos planes de vigilancia radiológica ambiental, controlados por el CSN, que tienen como objetivo asegurar que no se producen exposiciones a radiaciones ionizantes, debido a la presencia de radiactividad en el medio ambiente. Estos planes se encargan de controlar la radiactividad en el exterior de las instalaciones, el cumplimiento de las normas españolas e internacionales y la colaboración con las autoridades.

En España contamos con la Red de Vigilancia Radiológica Ambiental (REVIRA) que constituye un medio eficaz para conocer y controlar los niveles de radiactividad en todo el territorio nacional.

Esta red está constituida por otras dos redes:

- **La Red de Estaciones Automáticas (REA)**, que mide de forma continua y en tiempo real la radiación gamma y la concentración radiactiva en el aire, dando la alerta en caso de incidente o accidente radiológico.
- **La Red de Estaciones de Muestreo (REM)**, que permite analizar en laboratorio la radiactividad en muestras de partículas de polvo en aire, suelo, agua potable, aguas continentales y marinas y alimentos.

Pulsando sobre el siguiente mapa nos redirigimos a la página web del CSN donde se puede consultar la tasa de dosis gamma media diaria y mensual ($\mu\text{Sv/h}$):



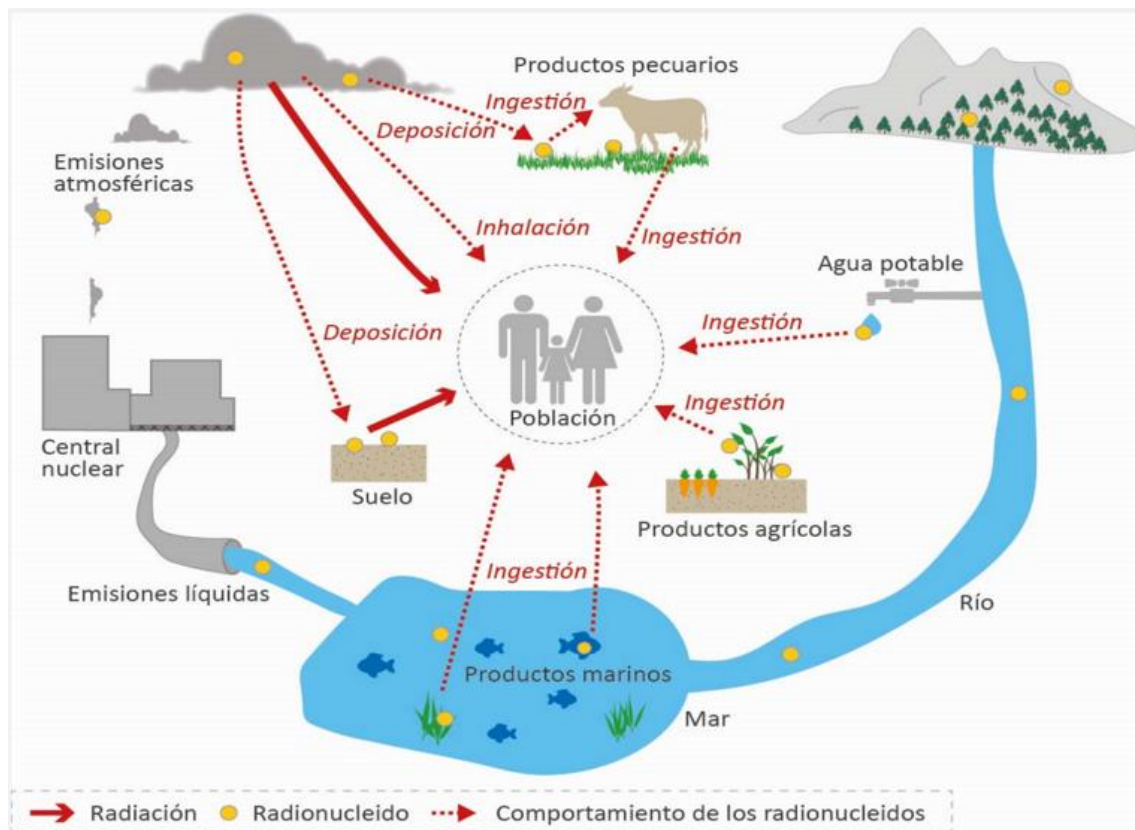
Situación en Japón

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.

Las personas estuvieron expuestas a la radiación atribuible al accidente por varias rutas diferentes, denominadas vías de exposición, como podemos observar en la figura 18.

Figura 18. Vías de exposición a la radiación



Fuente: IAEA. Informe del Director general.
Este contenido queda fuera de nuestra licencia Creative Commons.

La protección de los niños fue una preocupación especial de los padres en las zonas afectadas por el accidente. A los efectos de la protección, las recomendaciones actuales de la ICRP utilizan un coeficiente de riesgo ajustado al detrimento para toda la población, incluidos los niños, que es superior (en un 30 % aproximadamente) al de la población adulta. Esta diferencia se refleja en las recomendaciones y normas internacionales sobre protección radiológica.

Las consecuencias del terremoto, el tsunami y el accidente tuvieron que afrontarse en una situación de colapso de la infraestructura local. Debido al terremoto y al tsunami, muchos servicios públicos, viviendas y empresas habían quedado destruidos o dañados, y el acceso a las comunicaciones telefónicas y a Internet, los suministros de electricidad, gas y agua potable, el transporte público y la distribución de alimentos, gasolina y petróleo para la calefacción estaban

gravemente afectados. La temperatura exterior era baja, caía lluvia y nieve, y la calefacción era insuficiente. Por ello, muchos residentes no podían permanecer en los albergues por períodos prolongados sin ropa gruesa ni abrigos.

Estas difíciles condiciones afectaron a la ejecución de las medidas protectoras necesarias para salvaguardar a la población de la exposición a la radiación. Por ejemplo, las personas que se encontraban en albergues no pudieron ser descontaminadas mediante el lavado, porque en la mayoría de los albergues el agua estaba racionada y se reservaba para beber.

Las normas internacionales de seguridad para la protección radiológica en vigor en la época del accidente eran las Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección Contra la Radiación Ionizante y para la Seguridad de las Fuentes de Radiación de 1996, o las NBS de 1996. Estas normas prescribían que la dosis efectiva adicional que recibieran las personas como resultado de las prácticas planificadas y reguladas se limitara a 1 mSv por año (en circunstancias especiales, podía aplicarse una dosis efectiva de hasta 5 mSv a condición de que la dosis efectiva promedio de cinco años consecutivos no excediera de 1 mSv anual). Las NBS de 1996 subrayaban que estos límites de dosis no se aplicaban a las decisiones sobre la conveniencia y la modalidad de una intervención en caso de accidente, en que debería prestarse atención a las dosis proyectadas y a las posibles reducciones de las dosis evitables y las dosis residuales posteriores. Las prescripciones de las NBS de 1996 relacionadas específicamente con las emergencias establecían niveles de intervención genéricos para la adopción de medidas en una emergencia, como la orden de permanecer en espacios interiores, la evacuación y el bloqueo de la glándula tiroides, y niveles de acción genéricos para los alimentos.

Además, en 2002 el IAEA había publicado normas de seguridad que contenían requisitos específicos para la preparación y respuesta frente a una emergencia nuclear o radiológica, con inclusión de criterios de dosis para la aplicación de medidas protectoras, como la orden de permanecer en espacios interiores, la evacuación y el bloqueo de la glándula tiroides con yodo. Estas normas establecían requisitos para un adecuado nivel de preparación y respuesta en situaciones de emergencia nuclear o radiológica con el fin de reducir al mínimo las consecuencias de una emergencia, si llegara a producirse (en la sección 3 figura más información a este respecto).

En la época del accidente, las NBS de 1996 se estaban revisando, entre otras cosas, a la luz de las nuevas recomendaciones generales de la ICRP que se habían publicado en 2007. Justo antes del accidente, la ICRP había publicado recomendaciones específicas sobre la aplicación de sus nuevas recomendaciones para la protección de las personas en situaciones de exposición de emergencia y de los residentes en zonas con contaminación de larga duración después de un accidente nuclear o una emergencia radiológica.

Las recomendaciones de la ICRP de 2007 habían revisado el enfoque para hacer frente a las situaciones de exposición de emergencia, incluido el concepto del nivel de referencia para su uso en las estrategias de protección. El nivel de referencia recomendado era una dosis efectiva (ya sea aguda o anual) que podía ser superior a 20 mSv pero no a 100 mSv. Esta debía ser la base para establecer los criterios generales relativos a la adopción de medidas protectoras individuales en las situaciones inhabituales, en muchos casos extremas, en que las medidas tomadas para reducir las exposiciones tuvieran un efecto perturbador, en el entendimiento de

que una dosis efectiva que se aproximara a los 100 mSv justificaría casi siempre una medida de protección. Para las etapas de la rehabilitación después de un accidente, el nivel de referencia podía ser superior a 1 mSv, pero sin exceder de 20 mSv. Las nuevas recomendaciones destacaban también que el valor escogido como nivel de referencia dependería de las circunstancias concretas de la exposición de que se tratara.

Algunas medidas protectoras plantearon grandes dificultades a las autoridades y enormes problemas a las personas y comunidades afectadas. El refugio en albergues y la evacuación fueron particularmente perturbadores para unas 160 000 personas que se vieron aisladas de sus comunidades y solo tenían acceso a artículos limitados para satisfacer sus necesidades cotidianas. Finalmente esas personas fueron reubicadas, pero sus condiciones de vida normales se vieron gravemente afectadas. El empleo y la participación en actividades comunitarias eran limitados. Las perspectivas eran inciertas y la planificación para el futuro, muy difícil.

La población, que ya había sufrido las consecuencias del terremoto y el tsunami, se vio sometida también al estrés físico y psicológico adicional del refugio en albergues, la evacuación y la reubicación. Las restricciones impuestas a los productos de consumo público fueron importantes y necesarias, pero causaron daños económicos y sociales o de reputación a los productores locales.

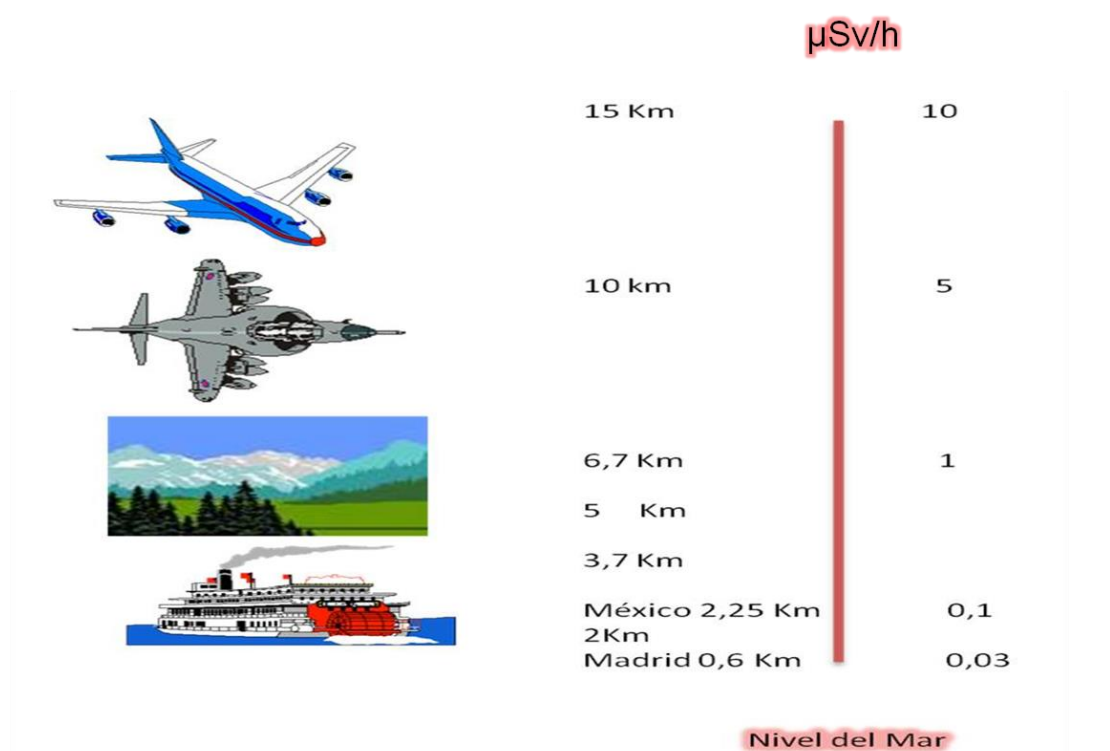
PROFUNDIZA 1

Radiación C3smica

Cuando los rayos c3smicos interactuan en la atm3sfera terrestre con elementos estables, se producen los denominados radionucleidos cosmog3nicos. Estos radionucleidos son el carbono-14, el tritio y el berilio-7. La radiaci3n c3smica es la fuente principal de estos radionucleidos en la Tierra.

La atm3sfera terrestre atenúa la radiaci3n c3smica, así que cuanto más aire haya entre nosotros y el espacio exterior más protegidos estaremos, como podemos observar en la figura 19. Por tanto, la exposici3n a la radiaci3n c3smica depende, entre otros factores, de la altitud a la que nos encontremos. Así, durante los vuelos en aviones comerciales recibimos más radiaci3n c3smica que en la superficie de la tierra. La cantidad de radiaci3n c3smica aumenta aproximadamente al doble cada 6.000 pies de altitud (o cada 1.800 metros, ya que 1 pie equivale a aproximadamente 0,3 metros). La latitud también influye en la radiaci3n c3smica que recibimos, ya que el campo magn3tico terrestre desvía la radiaci3n, de tal manera, que la dosis es menor en el Ecuador que en los Polos.

Figura 19. Radiaciones ionizantes de origen natural procedenes del espacio exterior.



Fuente: Rinc3n educativo. Foro Nuclear

http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/3_radiacin_ionizante_natural_y_artificial.html (15/01/2016)

CC 2.0

Cerca del 10 % de la exposici3n anual a las radiaciones ionizantes de origen natural procede del espacio exterior.

PROFUNDIZA 2

Dosímetros

No todos los dosímetros utilizan el mismo método para medir las dosis de radiaciones ionizantes. Algunos de los instrumentos utilizados son:

- **Dosímetro de pluma.** (denominado así por su tamaño y forma): La carga eléctrica y el voltaje de un condensador se reducen con la radiación ionizante. La dosis recibida desde que se haya cargado puede leerse a partir de la posición de un hilo metálico en una escala del dispositivo. El valor mostrado se puede reiniciar a cero con una nueva recarga. Estos dosímetros pueden registrar radiación gamma y de rayos X, así como radiaciones beta.
- **Dosímetro de película.** La película utilizada se ennegrece en mayor o menor medida en función de la energía (radiación) que recibe. La placa en la que se pone la película cuenta con diferentes filtros destinados a ampliar la sensibilidad y para poder diferenciar radiaciones fuertes y débiles. Una vez que la radiación ha impresionado la película la medida se realiza comparando los tonos negros con otras películas sometidas a diferentes radiaciones (patrón).
- **Dosímetro de termoluminiscencia (TLD).** En determinados cristales la radiación de rayos X o de rayos gamma motiva cambios microscópicos, que resultan en luz visible cuando se libera la energía de radiación absorbida al calentar el cristal. La dosis se calcula a partir de la cantidad de luz emitida.
- Los **dosímetros digitales** se sirven de sensores electrónicos y procesamiento de señales y muestra la dosis de radiación recibida en una pantalla, mayoritariamente en μSv . Estos dispositivos se pueden configurar de forma que si se alcanza un nivel determinado se emita una señal (por ejemplo acústica).

Figura 20. Algunos ejemplos de dosímetros



Fuente: Rincón educativo. Foro Nuclear
<http://www.rinconeducativo.org/radiacio/dosimetros.jpg> (15/01/2016)
CC 2.0

PROFUNDIZA 3

Planes de emergencia en España

Las instalaciones nucleares y radiactivas están diseñadas siguiendo unas normas de seguridad muy estrictas, lo que garantiza que la probabilidad de que ocurran accidentes sea muy baja.

Antes de conocer cuáles son los planes de emergencia existentes en nuestro país, es importante conocer la diferencia entre accidente e incidente.

Un accidente se define como un acontecimiento imprevisto que provoca daños a una instalación o altera su buena marcha y que puede implicar, para una o más personas, recibir una dosis de radiación ionizante superior a los límites de dosis establecidos.

Si el acontecimiento imprevisto tiene escasa (o nula) trascendencia fuera del emplazamiento de la instalación implicada, se habla de incidente.

A pesar de las grandes medidas de seguridad existentes en las instalaciones nucleares y radiactivas, que hacen que la probabilidad de que ocurra un accidente sea muy baja, esta posibilidad no es nula. Ello hace prudente tener planes de emergencia, en donde están previstas las actuaciones a seguir en caso de que ocurra un accidente. Los planes de emergencia tienen dos objetivos fundamentales:

- Reducir el riesgo o mitigar las consecuencias de los accidentes en su origen.
- Evitar o, al menos, reducir en lo posible los efectos adversos de las radiaciones ionizantes sobre la población y el medio ambiente.

El plan de emergencia en centrales nucleares se organiza en dos niveles distintos y complementarios:

- Nivel de respuesta interior. Las actuaciones de preparación y respuesta a situaciones de emergencia en este nivel, están recogidas en el Plan de Emergencia Interior (PEI), que es específico para cada central nuclear, es elaborado y puesto en práctica bajo el control regulador del CSN y aprobado por resolución Ministerial.
- Nivel de respuesta exterior. Las actuaciones de preparación y respuesta a situaciones de emergencia en este nivel se establecen en:
 - o Planes de emergencia exteriores a las centrales nucleares (PEN), que a su vez incluyen los planes de actuación de los grupos operativos y los planes de actuación municipal en emergencia nuclear (PAMEN).
 - o Plan de emergencia nuclear del nivel central de respuesta y apoyo (PENCRA) a los anteriores, que incluirá la solicitud de la prestación de asistencia internacional.

Estos planes de emergencia nuclear establecerán los objetivos y el alcance específicos, la organización, estructura y funciones de éstos, los medios humanos y materiales y los recursos

necesarios, los procedimientos de actuación operativa para su movilización y actuación ordenada y eficaz, así como el esquema de coordinación entre las distintas Administraciones públicas llamadas a intervenir.

El Plan Básico de Emergencia Nuclear (PLABEN) constituye la directriz que contiene las normas y criterios esenciales para la elaboración, implantación material efectiva y mantenimiento de la eficacia de los planes de emergencia nuclear. Dichas normas y criterios esenciales se circunscriben a los planes de emergencia nuclear del nivel de respuesta exterior que han de elaborarse, implantarse materialmente y mantenerse en un adecuado grado de eficacia para atender las situaciones que puedan derivarse de accidentes en centrales nucleares.

Para tomar las medidas de protección necesarias en caso de accidente, en el PLABEN se definen tres zonas:

- Zona 0 o bajo control del explotador. Área en la que el titular de la instalación tiene capacidad legal para impedir o limitar el acceso. Las medidas de protección aplicables en la zona 0 se establecen en el PEI.
- Zona I o zona de medidas de protección urgentes. Es el círculo de 10 km de radio, concéntrico con la central nuclear, que incluye a la zona 0. En esta zona deberán planificarse medidas de protección urgentes destinadas a reducir el riesgo de aparición de efectos deterministas entre la población. Además, en esta zona se deberá planificar, también, la aplicación de medidas de protección para reducir las dosis a largo plazo provenientes de las sustancias radiactivas depositadas y de la ingestión de alimentos y agua contaminados.

La zona I se divide en tres subzonas, atendiendo al nivel de riesgo esperable en cada una de ellas:

o Subzona I A comprende el círculo de 3 km de radio, concéntrico con la central nuclear.

o Subzona I B es la corona circular comprendida entre las circunferencias de radios de 3 y 5 km, concéntricas con la central nuclear.

o Subzona I C es la corona circular comprendida entre las circunferencias de radios de 5 y 10 km, concéntricas con la central nuclear.

- Zona II o zona de medidas de protección de larga duración. Es la corona circular comprendida entre las circunferencias de radios de 10 y 30 km, concéntricas con la central nuclear. En esta zona se deben planificar medidas de protección para reducir las dosis a largo plazo provenientes de las sustancias radiactivas depositadas y de la ingestión de alimentos y agua contaminados.

Figura 21. Zonas definidas en el PLABEN para tomar las medidas de protección necesarias en caso de accidente.



Fuente: Rincón educativo. Foro Nuclear
http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/6proteccion_radiologica.html (15/01/2016)
CC 2.0