



Academia del Mar

CUADERNO TALÁSICO N°39

Presentado por:

Académico de Número Abel González

Tema:

Contaminación radiológica del mar.

Presentación:

Abril de 2013

Expuesto y debatido en la Sesión Plenaria Pública realizada el

30 de abril del año 2013

CONTAMINACIÓN RADIOLÓGICA DEL MAR.

Resumen:

Los mares contienen sustancias radioactivas, las que tienen el potencial de causar efectos dañinos en la flora y fauna marina y en los seres humanos debido a que emiten radiación ionizante. La mayoría de las sustancias radioactivas presentes en el mar provienen de la misma génesis de la hidrosfera y sus características han sido permanentemente modificadas por procesos naturales. Sin embargo, desde el advenimiento del homo sapiens los seres humanos han vertido al mar sustancias radioactivas adicionales, tanto naturales como artificiales. Es así que un inventario radioactivo generado por la humanidad se ha venido añadiendo al inventario natural primordial de los mares.

Las fuentes de la radioactividad antropogénica del mar incluyen: vertidos de procesos industriales que utilizan materiales radioactivos naturales; operaciones militares de las potencias nucleares, principalmente miles de ensayos de bombas nucleares que causaron cuantiosas precipitaciones radioactivas en los mares; descargas radioactivas provenientes de las marinas de guerra nuclearizadas, incluyendo naufragios de buques y submarinos nucleares; pérdidas de satélites artificiales nuclearizados; vertidos de sustancias radiactivas artificiales originadas en operaciones civiles, fundamentalmente debidos al uso médico e industrial de materiales radioactivos y a la generación núcleo-eléctrica; y, descargas al mar causadas por accidentes en instalaciones nucleares civiles como los ocurridos en las centrales nucleoelectricas de Chernobyl y de Fukushima.

Esta memoria abarca: una introducción del escenario de la radioactividad en el mar; una tutoría sobre los fenómenos de radioactividad y radiación ionizante y sobre los efectos de la exposición a las radiaciones de los seres humanos y su hábitat; una descripción de las sustancias radioactivas naturales primigenias de los mares; y. una evaluación de las contribuciones de la sociedad post-industrial a la radioactividad de los mares, especificando las contribuciones concretas tanto de actividades nucleares militares como pacíficas. La memoria concluye con un epílogo presentando una discusión sobre cuestiones relacionadas con la influencia de la radioactividad en los

mares del sur y en la Antártida y sobre las posibles políticas de la Argentina en la materia.

1 El Académico Ingeniero Abel Julio González es graduado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires y ha completado varios cursos de postgrado en temas de la protección radiológica y de seguridad nuclear. Sus funciones actuales son las siguientes: asesor de la Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina; vicepresidente de la International Commission on Radiological Protection (ICRP), que es la organización profesional no gubernamental que provee las recomendaciones básicas que constituyen el fundamento de las normas de seguridad radiológica y nuclear nacionales e internacionales; representante en el Comité Científico de la Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), que es el órgano de la Asamblea General de las Naciones Unidas que evalúa los niveles y efectos de la exposición a las radiaciones, miembro de la Comisión de Seguridad del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), que es el cuerpo que establece los estándares internacionales de seguridad radiológica y nuclear. Actualmente, también está presidiendo el Grupo de Trabajo ad hoc de la ICRP abocado a las lecciones del accidente de Fukushima-Daichi y el Grupo de evaluación de las consecuencias de este accidente creado por el OIEA. Hasta hace pocos años, y por alrededor de dos décadas, fue el Director del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en los temas de su competencia. También ha sido miembro del Comité de Protección Radiológica y Salud Pública (CRPPH) de la Agencia de la Energía Nuclear (NEA) de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) con sede en París. Su carrera profesional se desarrolló en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), en la que estuvo a cargo del Departamento de Ingeniería de la Protección y luego de la Gerencia de Protección y seguridad, culminando su carrera con el cargo de Director y miembro del Directorio. Enseñó en las cátedras de Física General, Mecánica Racional, Física Electrónica y Electroacústica de la Facultad de Ingeniería de la UBA y fue fundador y primer Director del Curso de Postgrado sobre Protección Radiológica y Seguridad Nuclear. Es profesor regular en cursos del OIEA y en cursos de la World Nuclear University y de la Universidad de Montpellier. Ha publicado más de doscientos trabajos científicos y técnicos sobre esta temática y ha contribuido en numerosas publicaciones de comités y grupos internacionales especializados en esta área. Fue Vicepresidente de la International Radiation Protection Association (IRPA) y Presidente del Congreso Internacional IRPA12. Es miembro fundador de la Sociedad Argentina de Radioprotección (SAR) y miembro de honor de la Sociedad Española de Protección Radiológica. Ha recibido varias condecoraciones

profesionales, entre ellas las siguientes: “Servicios Distinguidos del OIEA” en reconocimiento a su trabajo en el Proyecto Internacional de Chernobyl, en 1990; Morgan, de la Health Physics Society, por “sus contribuciones sobresalientes en las Ciencias y las Artes de la Protección Radiológica” (en dos oportunidades: en Denver, Colorado, en el 25 de Junio del 2000, y en San Diego, California en el 2003); (28th) Lauriston S. Taylor Lecturer de la National Commission of Radiation Protection and Measurements (NCRP) en 2004; “Special Service Award del OIEA” en 2004; “Marie Curie Prize”, en el 2008; y, Medalla Académica Georgyi A. Zedgenidze por “su gran contribución al fortalecimiento de la cooperación internacional entre los centros rusos de investigación”, en Obninsk, Federación Rusa, en 2012. En el Congreso IRPA XI en Madrid, en marzo del año 2004, recibió la mayor condecoración internacional en la disciplina de la protección radiológica –el Premio Sievert; y, en el año 2005, compartió el Premio Nóbel de la Paz otorgado al OIEA.

PRÓLOGO

Esta memoria describe la radioactividad de los mares. Uno de sus propósitos es resumir la información disponible sobre el inventario de sustancias radiactivas en los océanos y sobre las entradas de estas sustancias al medio ambiente marino. Esta dividida en cuatro capítulos, a saber: una introducción del escenario general de la radioactividad de los mares; una tutoría de los fenómenos de radioactividad y radiación ionizante y los efectos de la exposición a las radiaciones sobre los seres humanos y su hábitat; una descripción genérica del inventario de sustancias radioactivas naturales primigenias de los mares; una evaluación detallada de las contribuciones de la sociedad post-industrial a la radioactividad de los mares, especificando las contribuciones concretas de actividades nucleares tanto militares como pacíficas; y un epílogo que discute cuestiones relacionadas con la influencia de la radioactividad en los mares del sur y en la Antártida y sobre las posibles políticas de la Argentina en la materia.

Las descripciones habituales de la radioactividad de los mares se suelen limitar a los inventarios antropogénicos, en particular a la descarga de desechos radiactivos al mar y también a lo que se ha llamado eufemísticamente ‘accidentes y pérdidas’ en el mar, que incluye descargas al mar tan peculiares como submarinos y satélites nucleares. Esta memoria aspira a ser más completa, haciendo hincapié inicialmente en las fuentes no-antropogénicas de radioactividad marina con el fin de dar una perspectiva adecuada al inventario antropogénico de los mares, proporcionando una representación vis-à-vis de lo que suele denominarse

el inventario de fondo 'natural' de los materiales radiactivos en los océanos del mundo. Finalmente la memoria estima las sustancias radioactivas vertidas directa- o indirectamente a los mares por la humanidad, incluyendo las procedentes de operaciones militares y también de los usos pacíficos de la energía nuclear y sus derivados.

Mientras que la radioactividad natural suele ser casi invariable, decayendo sobre un largísimo periodo de tiempo, la radioactividad de muchas de las sustancias radioactivas antropogénicas descargadas en los océanos decae a niveles triviales dentro de un tiempo que es corto en comparación con los periodos globales de dispersión marina. Por esta razón, las sustancias radioactivas con vida media de menos de 10 años no suelen incluirse en las evaluaciones marinas y solo serán mencionadas superficialmente en esta memoria.

Finalmente, se debe subrayar que esta memoria no aborda el complejo problema de la protección contra los efectos nocivos de la exposición a las radiaciones ionizantes generadas por la radioactividad y de la seguridad radiológica y nuclear en general. (Por otra parte, se debe destacar que el término seguridad es ambiguo en el idioma castellano y se lo utiliza como sinónimo de los términos safety y security en idioma inglés, que son dos conceptos muy distintos derivados de los adjetivos latinos salvus y securus respectivamente; lamentablemente tanto el idioma castellano como otros importantes idiomas europeos han perdido esa distinción, lo que ha ocasionado muchos problemas de entendimiento en esta área.)

Esta memoria no esta referenciada por cuanto la información y datos que se presentan en ella están basados fundamentalmente en las estimaciones de tres organizaciones internacionales prestigiosas (las que serán descritas en la introducción): el Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica, el Organismo Internacional de Energía Atómica y la Comisión Internacional de Protección Radiológica; las publicaciones de estas organizaciones están libremente disponibles en www.unscear.org, www.iaea.org, y www.icrp.org., respectivamente.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 ESCENARIO

I.1.1. La Radioactividad Natural

Muchas sustancias radiactivas nativas contribuyen a la radiactividad de los mares. Es que la formación primigenia del cosmos en general y de la hidrosfera del planeta Tierra en particular involucró la creación de grandes cantidades de elementos radiactivos a los que generalmente se los denomina 'naturales'. Desde aquellos tiempos primordiales estos elementos han contribuido a un inventario radioactivo 'natural' que siempre formó parte de los mares.

Por otra parte, grandes cantidades de sustancias radioactivas naturales llegan al mar continuamente como consecuencia de procesos regulares tales como la erosión, las lluvias y las erupciones volcánicas.

Es así que a través de los tiempos la radiactividad de los mares fue sometida a una gran variedad de transformaciones físicas y reacciones químicas. Como resultado final de estos procesos de la naturaleza, los mares presentan un enorme y diverso inventario de sustancias radiactivas naturales.

I.1.2. Radioactividad Natural Antropogénica

Con la aparición de las sociedades humanas organizadas, algunas de sus acciones comenzaron a alterar el medio ambiente marino en general. El vertido al ambiente de sustancias residuales de actividades humanas es un ejemplo de esta alteración. A veces estos residuos contienen sustancias radiactivas que contribuyen al inventario radioactivo de los mares. El desarrollo de industrias humanas ancestrales, tales como la agricultura y la minería, facilitó el proceso de descarga de materiales radioactivos naturales al medio ambiente muchos de los cuales llegarían eventualmente a los mares. En el transcurso del tiempo, estas actividades primitivas de las sociedades humanas supuestamente deben haber incrementado los niveles primordiales del inventario de radioactividad natural de los mares. Sin embargo, si bien no existen datos fehacientes, el posible incremento del inventario radioactivo marino debido a todas las actividades humanas debe haber sido extremadamente insignificante vis -à-vis el enorme inventario primordial natural de los mares.

Estas actividades humanas tempranas fueron las precursoras de la principal contribuyente a la radioactividad antropogénica de los mares: la generación de restos radiactivos, es decir de residuos y desechos que contienen sustancias radioactivas, naturales y artificiales, y para las que no está previsto ningún uso. A menos que se desintegren, estos restos radiactivos llegan eventualmente al medio ambiente y con el tiempo una fracción significativa de ellos puede terminar en los mares.

A principios del siglo XX, el descubrimiento del fenómeno de la radiactividad, así como el empleo ulterior de sustancias radiactivas naturales, tales como el radio, fue la génesis

de industrias que utilizan adrede sustancias que presentan radiactividad natural. La extracción y tratamiento de minerales para la obtención de estas sustancias y su posterior utilización generan restos radiactivos naturales, los que habitualmente son descartados esencialmente arrojándolos al medio ambiente con poco o nada de control. El mundo contemporáneo facilitó la evolución de estas industrias que actúan tecnológicamente sobre las concentraciones de materiales radiactivos naturales (los así denominados, NORMs, de la expresión inglesa 'naturally occurring radioactive materials'). Este desarrollo ha resultado en la liberación al mar de desechos y residuos procedentes de las actividades de industrias NORM tales como: la extracción y tratamiento de minerales y arenas que contienen sustancias radioactivas naturales, fundamentalmente para la industria electrónica moderna; industrias extractivas de carbón para la producción de energía, el que al quemar deja cenizas que pueden contener concentraciones importantes de sustancias radiactivas naturales; y, fundamentalmente, el uso de roca de fosfato para producir insumos para la industria química cuyo residuo de fosfoyeso radioactivo fue eliminado durante años en los mares.

I.1.3. La Radioactividad Artificial Antropogénica

Además de la generación de descargas al mar de sustancias radioactivas naturales, algunas desechadas por la misma naturaleza y otras por actividades humanas, el hombre ha creado sustancias radioactivas que no se encontraban en la naturaleza primigenia. Se denomina radiactividad 'artificial' al fenómeno que caracteriza a estas sustancias (se trata de una adjetivación ambigua y confusa, porque la radioactividad artificial es un fenómeno natural que ha sido inducido por la ciencia y sapiencia humana).

Desde su descubrimiento gradual durante el siglo XX, las cantidades de sustancias radiactivas artificiales fueron extremadamente limitadas a actividades de laboratorio. Sin embargo, hacia el alba de la Segunda Guerra Mundial ocurrió un desarrollo que sería el origen de la mayor parte del inventario corriente de sustancias radioactivas artificiales en el mar: las aplicaciones nucleares militares. En primer lugar, después del bombardeo nuclear de Hiroshima y Nagasaki en Japón, las potencias nucleares implementaron una secuencia intensiva de ensayos de armas nucleares, la que se convirtió en uno de los mayores contribuyentes antropogénicos de los vertidos radiactivos en los mares. Por otra parte, las marinas de esas potencias comenzaron a utilizar la energía nuclear para la propulsión de sus

navíos de guerra y causaron numerosas pérdidas radioactivas en el mar. Finalmente, materiales radioactivos son utilizados en satélites militares que cuando caen suelen hacerlo en los mares. Al desarrollo militar siguió el empleo civil de los materiales radioactivos artificiales, fundamentalmente en medicina y en la generación de energía núcleo-eléctrica, lo que origina nuevas descargas al mar de estos materiales.

I.2. ASPECTOS RELEVANTES DE LOS OCÉANOS

Por razones de simplicidad y con el fin de presentar un panorama general de la radioactividad en el mar, los océanos se representan en esta memoria como una sola entidad. En la realidad, la situación es más complicada: desde el punto de vista de la dispersión, los océanos no son una entidad y las sustancias radiactivas que existen o se descargan en un dado mar no pueden ser transferidos de inmediato a los océanos en su conjunto; ejemplos de ello son el Mar de Kara y el Mar Báltico, donde han ocurrido descargas importantes pero tienen un intercambio muy lento con mares vecinos. Mas

aún, sustancias radioactivas han sido depositados en grandes profundidades oceánicas donde tienen limitada su dispersión fundamentalmente por la variabilidad térmica vertical de las aguas y, como resultado, la dispersión regional y global se puede retrasar durante períodos de tiempo muy largos.

Algunas sustancias radiactivas, una vez introducidos en el medio ambiente marino, permanecen en solución, por ejemplo, las sustancias conteniendo tritio, y en un tiempo relativamente corto se dispersan totalmente en los océanos del mundo. Otras sustancias radiactivas, por ejemplo los compuestos de cesio, precipitan gradualmente de la columna de agua por procesos de sedimentación y así se pueden eliminar por completo del agua antes de que ocurra alguna dispersión significativa hacia los mares locales.

En casos en que se ha eliminado en el mar residuos radiactivos sólidos, la dispersión en la zona marítima local puede ser retrasada por la forma de los residuos y el contenedor en el que los contiene. En la mayoría de los casos, gran parte del contenido radiactivo es retenido durante largos períodos de tiempo, lo que produce el decaimiento físico de muchas de las sustancias radioactivas que componen los residuos y la dispersión de sólo una fracción del inventario radiactivo.

Por lo tanto, hay muchos factores que influyen en la dispersión de las sustancias radiactivas en los océanos. Estas consideraciones tienen que ser

tomadas en cuenta al evaluar los impactos locales, regionales y mundiales de la radioactividad de los mares.

I.3. CONSECUENCIAS DE LA RADIOACTIVIDAD EN EL MAR

La presencia de sustancias radiactivas en el mar puede causar daño a los seres humanos y a la flora y fauna marina como resultado de la exposición a la radiación ionizante que emite esa radioactividad. La exposición de los seres humanos puede ocurrir a través del consumo de productos alimenticios procedentes de los océanos, a través de la exposición directa como consecuencia de la natación o de la exposición a los depósitos a la orilla del mar o por la inhalación del material resuspendido de la superficie del mar. Por esta razón, se aplican controles sobre la liberación de materiales radiactivos a los océanos, pero hay excepciones: por ejemplo, la descarga de radioactividad de origen natural es raramente controlada y tampoco se controla la radioactividad que llega al mar como resultado de actividades militares; la radioactividad producida por accidentes es por definición incontrolable.

El impacto en los seres humanos y en la flora y fauna marina de la radioactividad en los mares depende de muchos factores, y aunque en general se relaciona con la cantidad y composición de las sustancias radiactivas inyectadas o que ya estén presente en los océanos, la exposición de determinados grupos de población depende de la ubicación y de los hábitos del grupo, de la dispersión de los materiales radiactivos en los océanos y de las características físicas y químicas de los materiales radiactivos.

Dependiendo de sus formas físicas y químicas, las sustancias radiactivas pueden dispersarse a través de los océanos del mundo o, en otros casos, su dispersión puede ser limitada con la radioactividad concentrándose cerca del punto de liberación. Esta característica influye fuertemente en la naturaleza del riesgo radiológico que presenta la radioactividad; si la sustancia radioactiva se dispersa a nivel mundial, dará lugar a la

exposición de un gran número de personas y de una masa biológica enorme, aunque debido a la gran dilución en los océanos, las dosis de radiación incurrida por individuos por lo general será pequeña. Por otro lado, existen sustancias radiactivas que tienden a permanecer localizadas, tales como los componentes de plutonio, las pueden causar la exposición a la radiación de sólo unos pocos individuos pero posiblemente a niveles significativos.

Las sustancias radioactivas están sujetas a decaimiento físico, es decir su radiactividad disminuye en el tiempo, y esto influye en el grado en que se dispersan a nivel mundial y también en su impacto radiológico. Por ejemplo, las liberaciones de sustancias radioactivas de vida corta, como las de un tipo de yodo que tiene una vida media de ocho días y que es ostensible en los accidentes nucleares, pueden causar impactos locales, pero no impactos regionales y mucho menos mundiales.

Las sustancias radioactivas presentan distinta radio-toxicidad y el impacto radiológico de una descarga al mar no sólo depende de la cantidad descargada también de las características radiológicas y biológicas de la sustancia.

La magnitud del riesgo radiológico derivado de la presencia de sustancias radiactivas en los mares depende de muchas variables. Con el fin de evaluar la significación radiológica de un inventario o de una descarga de sustancias radiactivas en particular es necesario realizar una evaluación radiológica en la que todos los factores radiológicos y ambientales que influyen en la exposición a la radiación, incluyendo la naturaleza de la población expuesta, se evalúen. Sólo por este medio puede determinarse correctamente la significación radiológica de un inventario o una descarga de sustancias radioactivas a los océanos

Con respecto a la flora y fauna marina se debe destacar que todas las especies presentes en el mar han existido y evolucionado en un medio ambiente que las ha mantenido expuestas a la radiación ionizante de fondo natural. Sin embargo, más recientemente los organismos también se han visto expuestos a fuentes de radioactividad artificial, como la proveniente de la precipitación mundial provocada por los ensayos de armas nucleares en la atmósfera y, en determinados lugares, las emisiones controladas y accidentales de material radiactivo.

El Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR) ha evaluado las dosis y tasas de dosis de radiación ionizante por debajo de las cuales era poco probable que sufrieran efectos las poblaciones de la biota no humana. Consideró que las distintas respuestas a la exposición a las radiaciones que podrían ser apreciables a nivel de población eran las relativas a la mortalidad, la fertilidad, la fecundidad y la inducción de mutaciones. El UNSCEAR también consideró que los cambios reproductivos eran un indicador más sensible de los efectos de las radiaciones que la mortalidad, y que los mamíferos eran los organismos animales más sensibles. Sobre esa base, el UNSCEAR calculó las

tasas de dosis de los individuos más expuestos que probablemente no producirían efectos de importancia en la mayoría de las poblaciones.

I.4. ESTIMACIONES INTERNACIONALES

La comunidad científica internacional ha dedicado esfuerzos muy especiales para estudiar los fenómenos de la radioactividad y de las radiaciones ionizantes y existe un consenso universal único sobre ellos, que no es común en otras actividades científicas. Las estimaciones de los niveles globales de radioactividad y de radiación ionizante, así como los efectos globales derivados de la exposición a esta radiación, se basan fundamentalmente en el trabajo tres organizaciones internacionales prestigiosas, a saber: > el Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica, también conocido por sus siglas en inglés UNSCEAR,

> la Comisión Internacional de Protección Radiológica (su sigla en castellano es CIPR, pero es más conocida por su sigla en inglés, ICRP), y

> el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

La Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) es el organismo nacional Argentino que contribuye al trabajo de estas organizaciones.

I.4.1. El Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica

El UNSCEAR tiene la misión de estimar niveles y efectos de exposición a radiación ionizante. Sus informes se usan como base epistemológica para evaluar los riesgos de la radiación con el objeto de establecer paradigmas de protección. El UNSCEAR fue creado por la Asamblea General de Naciones Unidas en 1955, la que designó 21 países, entre ellos la Argentina, para que proporcionaran científicos como miembros del Comité. Desde 1958, el UNSCEAR ha informado regularmente sus estimaciones a la Asamblea General.

I.4.2. La Comisión Internacional de Protección Radiológica

La ICRP recomienda el paradigma o modelo aplicable a la protección contra las radiaciones. 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 (dado que los rayos X y el elemento radio eran las únicas fuentes de radiación conocidas hasta entonces); cambió su nombre en 1950 al actual.

I.4.3. El Organismo Internacional de Energía Atómica

Teniendo en cuenta las estimaciones epistemológicas del UNSCEAR y las recomendaciones sobre protección de la ICRP, el OIEA establece las normas o estándares internacionales sobre protección radiológica y seguridad nuclear; lo hace en co-patrocinio con otras organizaciones intergubernamentales en las Naciones Unidas. Es que 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 nacionales 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 radiológica y nuclear de alcance mundial.

I.5. CONTROLES SOBRE LAS DESCARGAS

Los océanos y sus mares, fuente de muchos recursos, es un territorio internacional en el que los movimientos de las aguas no conocen fronteras nacionales. Estos hechos hacen que la colaboración internacional sea esencial para estimar, evitar y combatir la contaminación marina global. Es así que con el fin de evitar daños a las personas o a las poblaciones expuestas a la radiación como resultado de la eliminación de vertidos radiactivos en los océanos, se han impuesto controles sobre estas prácticas tanto a nivel nacional como internacional.

Sin embargo esos controles solo se aplican fundamentalmente a actividades civiles controladas por autoridades regulatorias, actividades que, como quedará reflejado en esta memoria, solo representan a una

pequeña parte de los vertidos de radioactividad que se han hecho y continúan haciendo a los mares. Con esas limitaciones los acuerdos internacionales vinculantes mas importantes se describen a continuación.

I.5.1. El Convenio de Londres

Como resultado de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio humano realizada en Estocolmo en 1972, el concepto de prevención de la contaminación comenzó a regir en 1975, cuando entró en vigor el Convenio sobre la prevención de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias (Convenio de Londres sobre Vertimiento o simplemente Convenio de Londres).

Es así que la práctica de verter desechos industriales y radiactivos en el mar fue limitada por el Convenio de Londres en vigor desde 1975, el que es uno de los primeros convenios mundiales para la protección del medio marino de las actividades humanas. Su finalidad es promover el control efectivo de todas las fuentes de contaminación del medio marino y adoptar todas las medidas posibles para impedir la contaminación del mar por el vertimiento de desechos y otras materias. En la actualidad los Estados Parte en el Convenio son 82, incluida la Argentina.

En 1996 se aprobó el "Protocolo de Londres" con el objetivo de modernizar el Convenio y, en su momento, sustituirlo. En virtud del Protocolo se prohíben todos los vertimientos, a excepción de los desechos que puedan ser aceptables, recogidos en la siguiente lista: materiales de dragado; fangos cloacales; desechos de pescado; buques y plataformas; materiales geológicos inorgánicos inertes (por ejemplo, desechos de minas); materiales orgánicos de origen natural; objetos voluminosos constituidos principalmente por hierro, acero y hormigón; y flujos de dióxido de carbono resultantes de los procesos de captura de dióxido de carbono para su secuestro. El Protocolo de Londres entró en vigor el 24 de marzo de 2006 y cuenta actualmente con 32 Estados Parte.

Con respecto a las sustancias radioactivas, el Convenio de Londres encomienda al OIEA responsabilidades específicas como una organización internacional competente para la implementación de las obligaciones de los Estados Partes del Convenio, inter alia para la definición de los desechos de alto nivel radiactivo inapropiados para ser vertidos en el mar y para que formule recomendaciones a las autoridades nacionales en cuanto a la expedición de permisos especiales para el vertimiento en el océano de desechos de bajo nivel radiactivo; el OIEA recibió el mandato de examinar

constantemente las definiciones y recomendaciones a fin de limitar las consecuencias de las actividades de vertimiento. Al principio, los controles se impusieron sobre la naturaleza y las cantidades de residuos que podían ser eliminados en el mar y en los lugares en los que se permitía la eliminación. Sin embargo, hubo una presión internacional que aumento gradualmente para poner fin a la práctica de la eliminación en el mar. Así, bajo diversos convenios regionales, se prohibió la evacuación en el mar de residuos radiactivos – Mar Báltico (1974), Mar Mediterráneo (1976), Mar Negro (1992), ciertas áreas del Pacífico Sur (1985) y el sudeste del Pacífico (1989). En noviembre de 1993, las Partes Contratantes del Convenio de Londres finalmente prohibieron la eliminación de residuos industriales y radioactivos en el mar en todo el mundo.

El OIEA ha venido solicitando a las Partes Contratantes que proporcionen información sobre los materiales radiactivos que han entrado al medio ambiente marino debido a la eliminación en el mar de residuos radiactivos y debido a accidentes y pérdidas relacionados con materiales radiactivos. En respuesta a esta solicitud, el OIEA ha creado una base de datos y elaborado varios informes, por ejemplo el Inventario de los vertidos de residuos radiactivos en el mar, publicado como documento técnico IAEA TECDOC - 1105] en 1999, y el Inventario de los accidentes y las pérdidas en el mar que involucren materiales radiactivos publicado como documento técnico IAEA- TECDOC -1242 en el 2001.

1.5.2. La Convención sobre Seguridad de la Vida Humana en el Mar

El convenio internacional denominado Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS), en primer lugar, firmado en Londres en el año 1960, es el tratado más importante proteger la seguridad de los buques mercantes. Por tanto, es una convención importante en relación con el control de las descargas de materiales radiactivos en el mar debido a que limita indirectamente la posibilidad de que los materiales radiactivos en esos barcos entran en los mares.

La primera versión del Convenio SOLAS prescribe simplemente el número de botes salvavidas y otros equipos de emergencia, junto con los procedimientos de seguridad. Las versiones más recientes fueron adoptadas en 1929, 1948, 1960, y 1974. La Convención de 1960 - que se activó en 1965 - fue el primer gran logro para la Organización Marítima Internacional (OMI) después de su creación y representó un avance enorme en la actualización de los reglamentos de navegación comercial y en mantenerse al día con las nuevas tecnologías y procedimientos de la industria marítima. La versión 1974 simplificó el proceso para enmendar el

tratado y una serie de enmiendas han sido adoptadas desde entonces. La última Convención en 1974 , por tanto, incluido el procedimiento de "aceptación tácita " por el que las enmiendas entren en vigor de forma predeterminada a menos que los países presenten objeciones .

I.5.2. La Convención Conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos

El 5 de septiembre de 1997, una Conferencia Diplomática convocada por el Organismo Internacional de Energía Atómica y celebrada en su Sede del 1 al 5 de septiembre de 1997 aprobó la Convención conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos. La así llamada 'Convención conjunta' fue abierta a la firma en Viena el 29 de septiembre de 1997 durante la cuadragésima primera reunión de la Conferencia General del Organismo Internacional de Energía Atómica.

Si bien el control de la descarga de materiales radiactivos de instalaciones nucleares costeras o ribereñas no está sujeto a ningún instrumento internacional vinculante específico, la Convención conjunta requiere que cada Parte Contratante tome apropiadas medidas para garantizar que las descargas sean limitadas de acuerdo con las normas internacionalmente aceptadas en materia de protección radiológica.

I.5.3. La Convenciones sobre la pronta notificación de accidentes nucleares y sobre asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica

La Convención sobre la pronta notificación de accidentes nucleares fue firmada el 27 de octubre de 1986 y la Convención sobre asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica fue aprobada el 26 de septiembre 1986. Cada uno de estos convenios prevé la difusión de información y desencadena los mecanismos de respuesta para la asistencia mutua de urgencia en relación con un accidente nuclear o emergencia radiológica. En abril de 1981, la Organización Marítima Internacional publicó el Código de seguridad para buques mercantes nucleares, y el OIEA ha desarrollado una base de datos, llamada EVTRAM (eventos ocurridos durante el transporte de material radiactivo) , en relación con los incidentes y acontecimientos que ocurren mientras que el material radiactivo sea transportado por mar.

I.5.3. El Tratado de Prohibición de Ensayos de Armas nucleares en la Atmósfera, el Espacio Ultraterrestre y Debajo del Agua

En relación a las entradas de sustancias radiactivas a los océanos provenientes de operaciones militares, el único instrumento de control existente es el Tratado de Prohibición de Ensayos de Armas nucleares en la Atmósfera, el Espacio Ultraterrestre y Debajo del Agua, acordado en Moscú y que entró en vigor en 1963¹⁹⁶³. Este Tratado tuvo el efecto importante de poner fin a las pruebas de armas nucleares en la atmósfera y en el agua; sin embargo, permitió que las pruebas subterráneas continuaran.

I.5.4. El Programa de Acción Mundial para la Protección del Medio Marino

El Programa de Acción Mundial para la Protección del Medio Marino (PAM) es un instrumento no vinculante acordado entre estados bajo los auspicios del Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA. Su objetivo es la prevención de la degradación del medio ambiente marino debido a actividades realizadas en tierra, ayudando a los gobiernos a identificar y evaluar los problemas. En relación con el

Programa de Acción Mundial, el OIEA presta apoyo mediante el mantenimiento y la actualización de una base de datos de descargas de materiales radiactivos al medio ambiente (DIRATA).

I.5.5. Los Estándares del OIEA

En 1958, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar recomendó específicamente que el OIEA "prosiga los estudios necesarios y adopte las medidas convenientes para ayudar a los Estados a fiscalizar la evacuación o lanzamiento al mar de los desperdicios radiactivos, y a promulgar normas y elaborar reglamentaciones aceptables internacionalmente para evitar la contaminación del mar por materiales radiactivos en cantidades que perjudiquen al hombre y a los recursos marinos".

Desde entonces el OIEA está ayudando a la protección de los mares mediante el establecimiento de sus estándares de seguridad y sus provisiones para la aplicación de esos estándares, y también asistiendo a los Estados Partes del Convenio de Londres tal como se describe mas arriba.

El amplio conjunto de estándares de alta calidad establecidos por el OIEA, y revisados 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 Principios fundamentales de seguridad unificados, que representan un consenso internacional acerca de lo que debe constituir un alto grado de protección y seguridad, así como requerimientos y guías de seguridad. Con el firme apoyo de su Comisión sobre Normas de Seguridad, el OIEA se esfuerza por promover la aceptación y el uso a escala mundial de sus normas.

Sobre esta base, el OIEA ha proporcionado una serie de documentos de orientación a las autoridades nacionales sobre la limitación y regulación de las descargas de materiales radiactivos al medio ambiente en general y al mar en particular. Estos documentos están en armonía con las recomendaciones de la ICRP.

I.5.6. Acuerdos Regionales

A nivel regional, existen instrumentos vinculantes relacionados con el control de las descargas en varios mares regionales. Dos de ellos cubren el Mar Báltico (Convenio de Helsinki) y el Mediterráneo (Convenio de Barcelona). La Convención para la Protección del Medio Ambiente Marino del Atlántico del Nordeste (Convenio OSPAR) cubre un área marítima relativamente grande y en el que un gran número de instalaciones nucleares descargan material radiactivo al mar. El Convenio OSPAR compromete a las Partes Contratantes a que adopten todas las medidas posibles para prevenir y eliminar la contaminación del medio marino del Atlántico Nordeste mediante la aplicación del enfoque de precaución y las mejores tecnologías y prácticas ambientales. A través de la Declaración Ministerial de Sintra de 1998, impone objetivos cuantitativos sobre las concentraciones resultantes de las descargas.

I.5.7. Controles Nacionales

A nivel nacional, los controles de los vertidos procedentes de instalaciones nucleares son impuestos por las leyes y reglamentos locales los que por lo general se ha elaborado sobre la base de las recomendaciones de la ICRP y el OIEA. Estos reglamentos por lo general contienen requisitos cuantitativos de limitación de descarga de efluentes al mar.

En la Argentina, la dependencia nacional encargada de imponer esos reglamentos y controlar los vertidos radioactivos al mar es la Autoridad

Regulatoria Nuclear (ARN). La 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, creada en 1997 mediante la Ley Nacional de la Actividad Nuclear (N° 24.804). Su misión es proteger a las personas, el ambiente y las futuras generaciones del efecto nocivo de las radiaciones ionizantes.

CAPÍTULO II:

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

II.1. LOS FENÓMENOS RELEVANTES

II.1.1. Átomos, elementos, isótopos y nucleídos

Los fenómenos relevantes para esta memoria son la radioactividad y la radiación, pero para llegar a su representación se deberá describir sus generadores esenciales: átomos de elementos que constituyen isótopos y nucleídos. Como es sabido, los átomos son los constituyentes fundamentales de la materia en general y de los mares en particular. El átomo (nombre que proviene del griego ἄτομον, 'indivisible') es el bloque básico que compone la masa del universo como constituyente de la materia ordinaria con propiedades químicas bien definidas. El átomo está conformado a su vez por constituyentes más elementales sin propiedades químicas definidas: un núcleo atómico, en el que se concentra casi toda su masa, formado por partes, como los protones, con carga positiva, y neutrones, eléctricamente neutros, rodeado de una nube de electrones. Los mares están compuestos esencialmente por átomos de los elementos hidrógeno y oxígeno, pero contienen en pequeña proporción átomos de todos los elementos de la naturaleza. El elemento es un tipo de materia constituida por átomos de la misma clase, una sustancia homogénea que no puede dividirse en sustancias más simples. Cada elemento químico está formado por átomos del mismo tipo, con la misma estructura electrónica básica, la que no es posible dividir mediante procesos químicos.

Un isótopo es una variedad de átomo que tiene el mismo número atómico y que, por lo tanto, constituye el mismo elemento aunque tenga un diferente número de masa. El concepto de isótopo hace hincapié en las propiedades químicas del elemento, y generalmente se utiliza el término nucleído cuando se hace referencia a las propiedades físicas de un núcleo atómico, con una composición específica de sus componentes fundamentales, los protones y neutrones.

Además del hidrogeno y el oxígeno existen en el mar los 92 elementos químicos naturales. Estos elementos se dividen en alrededor de 300 nucleidos naturales, casi todos presentes en el mar en diversas concentraciones. Alrededor de 250 de estos nucleidos son estables, es decir no se transforman en el tiempo. El resto son inestables, se desintegran transformándose en otros nucleidos emitiendo energía radiante. La transformación responde a una función temporal exponencial caracterizada por una 'vida media' (el tiempo en el que la cantidad del nucleido 'madre' se reduce a la mitad). (Se debe destacar, sin embargo, que algunos de los nucleidos caracterizados como aparentemente estables son predichos por la teoría de ser radiactivos de muy larga vida media). Los elementos inestables son denominados radioactivos (radioisótopos o radionucleidos) y la energía radiante que emiten se denomina radiación.

A los nucleidos creados por la naturaleza se deben agregar los muchísimos otros creados artificialmente por el hombre. Actualmente se conocen más de 3100 nucleidos y la mayoría de ellos son radioactivos.

II.1.2. Radioactividad y Radiación

La radiactividad es un fenómeno natural que ocurre cuando el núcleo inestable de un radionucleido se transforma espontáneamente liberando energía en forma de radiación. La radiación liberada puede presentarse como partículas (por ejemplo, electrones, neutrones y partículas alfa) o como ondas electromagnéticas, tal como la radiación gamma, en uno de los fenómenos más curiosos de la naturaleza: la dualidad onda-partícula con que se presenta la radiación.

La radiación transporta energía en 'paquetes' (denominados quantum) que contienen cantidades de energía definidas. En su tránsito por el espacio los quantum de radiación pueden interactuar con átomos. Cuando la cantidad de energía que transporta un quantum es suficiente como para arrancar a un electrón de un átomo, proceso que se conoce como ionización, se designa a la radiación con el nombre radiación ionizante. Esta memoria solo se ocupa de la radiación ionizante, la que por simplicidad será escuetamente denominada radiación.

Además de la radiación generada por radionucleídos, la radiación también puede ser producida por aparatos creados por el hombre, por ejemplo equipos generadores de rayos X y aceleradores de partículas, aunque esta no es importante para los mares.

Mas aún, el universo esta 'regado' por radiación de origen sideral e incierto, generalmente denominada 'rayos cósmicos', los que son indirectamente importantes para la radioactividad de los mares. Los rayos cósmicos están constituidos generalmente por partículas de muy alta energía. La mayoría de ellas, sin embargo, no llega a la superficie de la hidrosfera debido a que interaccionan con la atmósfera que actúa como un blindaje. Sin embargo, de esa interacción con las capas atmosféricas se desprende una verdadera catarata de radiación que llega a la superficie de los mares con energías muy atenuadas y variadas. Mas aún, de esas interacciones se originan algunos radionucleidos, así denominados cosmogónicos; uno de ellos es un radioisótopo del hidrógeno, el ^3H , denominado tritio que es significativo para la radioactividad del mar.

Dado que los radioisótopos son ubicuos en la naturaleza, la radiación es omnipresente en el universo. Como se indicó, además de los elementos que componen el agua, el hidrógeno y el oxígeno, también están presentes diluidos en las aguas marinas todos los radioisótopos primordiales, casi siempre en concentraciones muy bajas aunque, dado el ciclópeo volumen de los mares, la cantidad total de estos elementos en los mares es enorme.

II.2. CUANTIFICACIÓN

Una característica peculiar de las ciencias que se ocupan del estudio de la radioactividad, de las radiaciones es la plena armonización internacional de las magnitudes y unidades que se utilizan en su cuantificación. 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 radioactividad y de la radiación vis-à-vis otros fenómenos.

La memoria utilizará los prefijos de cuantificación de unidades prescritos por el sistema internacional, los que se describen en la tabla siguiente

Nombre	Símbolo	Valor	
yotta	Y	10^{24}	= 1 000 000 000 000 000 000 000 000
zetta	Z	10^{21}	= 1 000 000 000 000 000 000 000
exa	E	10^{18}	= 1 000 000 000 000 000 000
peta	P	10^{15}	= 1 000 000 000 000 000
tera	T	10^{12}	= 1 000 000 000 000
giga	G	10^9	= 1 000 000 000
mega	M	10^6	= 1 000 000
kilo	k	10^3	= 1 000
hecto	h	10^2	= 100
deca	da	10^1	= 10
deci	d	10^{-1}	= 0,1
centi	c	10^{-2}	= 0,01
mili	m	10^{-3}	= 0,001
micro	μ	10^{-6}	= 0,000 001
nano	n	10^{-9}	= 0,000 000 001
pico	p	10^{-12}	= 0,000 000 000 001
femto	f	10^{-15}	= 0,000 000 000 000 001
atto	a	10^{-18}	= 0,000 000 000 000 000 001
zepto	z	10^{-21}	= 0,000 000 000 000 000 000 001
yocto	y	10^{-24}	= 0,000 000 000 000 000 000 000 001

II.2.1. Magnitudes y Unidades de Radioactividad

La magnitud que describe la radioactividad en general, y la de los mares en particular, se denomina actividad, usualmente indicada como A, y se la define como el valor esperado del número de transiciones nucleares que tienen lugar en una cantidad dada de material (e.g., agua de mar) por unidad de tiempo. Por lo tanto, la unidad de actividad en el sistema internacional (SI) es la recíproca del segundo, s⁻¹, a la que se le ha dado el nombre especial bequerel (Bq). Debe notarse que en el pasado la unidad denominada curie fue (y sigue siendo) ampliamente utilizada (1 curie = 3.7 10¹⁰ bequerel).

Se debe destacar que un bequerel es una cantidad de radioactividad extremadamente pequeña. Por ejemplo una simple banana contiene cientos de bequerel de radioactividad natural. Esto es causa de confusión porque las actividades habituales son de millones y billones de bequerel lo que causa gran desconcierto en las audiencias no especializadas cuando se les informa que una actividad de millones de bequerel es 'baja'.

II.2.2. Magnitudes y Unidades Físicas de la Radiación

Las sustancias que presentan actividad emiten radiación ionizante, denominada simplemente como radiación. Como se ha visto, también lo hacen aparatos creados por el hombre y el cosmos.

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 de los mares y también la constitutiva de los tejidos humanos y de la flora y fauna marinas, se denomina dosis absorbida, D . La dosis absorbida es la magnitud física fundamental para cuantificar la radiación, y está definida por la ecuación:

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

donde:

$d\bar{\varepsilon}$ es la energía media impartida por la radiación ionizante a la masa dm .

En el sistema internacional de magnitudes y unidades (SI), la unidad de la dosis absorbida es el joule de energía per kilogramo de masa (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; $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$.

Contrariamente a lo que sucede con el Bq, el Gy es una unidad relativamente grande. Es decir que en la práctica se utilizan submúltiplos del Gy, lo que nuevamente crea confusión en las audiencias no especializadas.

II.2.2. Magnitudes y Unidades de Radiación con Propósitos de Protección

Los fenómenos naturales de la radioactividad y la radiación se han convertido en una especie de némesis del desarrollo tecnológico moderno (el público en general los asocia con actividades humanas especialmente de la energía nuclear y no con la naturaleza). Es que tanto los seres humanos, como su hábitat, y la flora y fauna universal, incluyendo la marina están expuestos a la radiación, e incurrir dosis de radiación, y se ha descubierto que la exposición a la radiación es perjudicial. Las consecuencias potenciales para la salud de los seres expuestos a la radiación, incluyendo los humanos, dependerán de la cantidad de radiación recibida, y también de los tipos de radiación involucradas y los órganos expuestos. Esto presenta desafíos especiales para la cuantificación de la radiación con propósitos de protección.

La radiación puede ser recibida desde el exterior de los cuerpos vivientes, a la que se denomina exposición externa. También puede originarse en sustancias radiactivas que hayan ingresado al cuerpo por varias vías, tales como la inhalación, ingestión, y la incorporación periférica, incluyendo la percutánea, o a través de llagas abiertas, y a estas se las denominas exposición interna.

Diferentes tipos de radiación tienen una eficacia desigual para inducir daño. Por lo tanto, en el caso de la exposición humana, 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:

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, Iones pesados	20
Neutrones	Una función continua de la energía del neutrón (ver Figura 1 y Ecuación. 4,3)

$D_{T,R}$ 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; es decir es el factor que 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 SI 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 al Gy: se la denomina sievert (Sv).

La tabla siguiente presenta los factores de ponderación de radiación, w_R , para los seres humanos. Los valores dan una idea general de la radio-eficacia de los diversos tipos de radiación.

Tabla . Factores de ponderación de la radiación w_R

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 humanos 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:

HT 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

Tejido	w_T	Σw_T
--------	-------	--------------

resulta de una exposición total del cuerpo; la ponderación se efectúa de forma que:

$$\sum_T w_T = 1$$

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 humanos.

Tabla . Factores de ponderación de los tejidos w_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

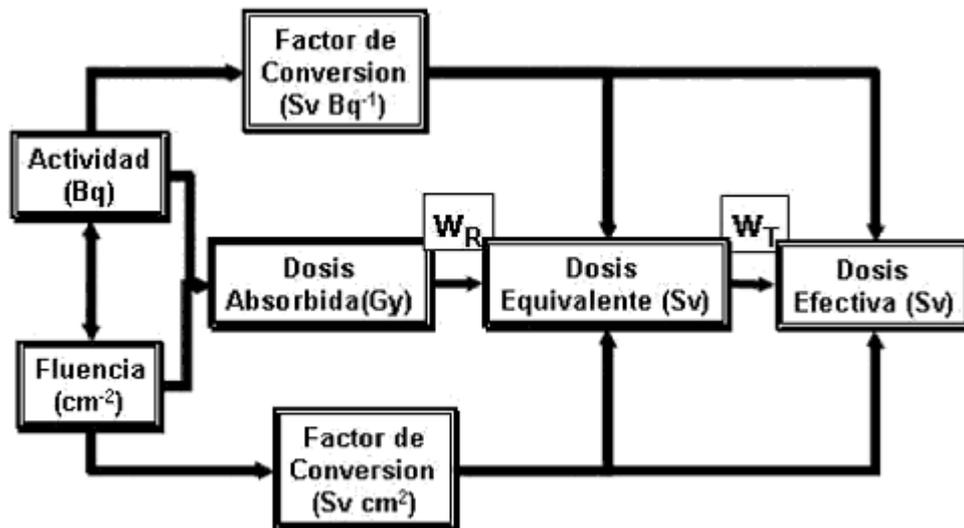
* Resto de los Tejidos: Adrenales, región extra torácica (ET), vesícula, corazón, riñones, nódulos linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo, útero/cérvix

La unidad para la dosis efectiva es la misma que para la dosis absorbida, J kg⁻¹, y su nombre especial también es Sv (en el pasado, la unidad utilizada fue el rem; 1 rem = 0.01 Sv). Dado que ambas magnitudes fundamentales para la protección humana, la dosis equivalente y la dosis efectiva, se miden en la misma unidad Sv (con su submúltiplo el millisievert, que equivale a una milésima parte de un 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 humanos, y la dosis efectiva se utiliza para evaluar las implicaciones en todo el cuerpo. Estas dos magnitudes sólo pueden ser formalmente utilizadas para las exposiciones humanas, pero se está desarrollando un sistema similar para la flora y fauna en general y por ahora para la exposición del medio ambiente en general se utilizan las magnitudes físicas sin ponderación es decir la dosis absorbida en gray o miligray. Mas aún, las magnitudes son utilizables solo en 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 que cause gran exposición a la radiación. En estos casos debe ser utilizada la dosis absorbida.

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

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



Una complicación adicional en el complejo sistema de cuantificación de la radiación es que la dosis equivalente y la dosis efectiva no pueden ser medidas directamente. Por consiguiente el sistema de protección incluye la definición de magnitudes operacionales que pueden medirse, y a partir de las cuales se pueden evaluar la dosis equivalente y la dosis efectiva. Es así que los instrumentos para la evaluación de las dosis en personas o en el ambiente deben ser calibrados contra magnitudes físicas operacionales que son rigurosamente definidas por ICRU y han sido incorporadas en las normas internacionales. Estas magnitudes operacionales se denominan 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.

II.3. NIVELES GLOBALES DE RADIACIÓN

Para dar cierta perspectiva a la exposición a las radiaciones derivadas de la radioactividad de los mares, es conveniente presentar un breve resumen de los niveles globales de radiación.

Los mayores niveles de exposición pública son ocasionados por la radiación de fondo natural y de los procedimientos de diagnóstico médico y

terapéutico. En el pasado también fue importante la exposición ocasionada por los ensayos de armas nucleares. La producción de electricidad por medio de centrales nucleares es un contribuyente menor a la exposición pública global, aun si se tienen en cuenta los accidente nucleares tales como el de Chernobyl y el de Fukushima. Se debe destacar además que existen muchas ocupaciones que causan exposición a la radiación de los trabajadores; una de los trabajos que causa mayor exposición ocupacional es la tripulación de aviones.

Todas las fuentes de exposición pública, médica y ocupacional son periódicamente estimadas por el UNSCEAR

Como se puede colegir de los capítulos precedentes y se desarrollará en los capitulos siguientes, desde el comienzo mismo de su existencia en el planeta, los seres humanos han estado expuestos a la radiación proveniente de fuentes naturales. Está radiación natural fue modificada por la actividad humana a lo largo de la evolución de la humanidad. Además, durante los últimos cien años aproximadamente han surgido nuevas fuentes de radiación creadas por el hombre, generalmente denominadas artificiales.

II.3.1. Las Fuentes Naturales de Radiación

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 los mares. Las tasas de exposición externa debida a los radionúclidos naturales varían considerablemente de un lugar a otro en la Tierra, las más bajas son a nivel del mar pero en muchos lugares terrestres pueden llegar a exceder 100 veces la media.

Un radionúclido 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 que los habita. La exposición al radón en los mares es prácticamente inexistente. La exposición debida a la inhalación del radón por las personas que viven o trabajan en interiores terrestres varía drásticamente dependiendo de la geología local, las características constructivas del hábitat 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.

II.3.2. Las Fuentes Militares de Radiación

Una fuente artificial significativa de exposición a las radiaciones, particularmente en relación con los mares, 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. La mayoría de estos ensayos se concentró en el período 1952-1958 y en los años 1961 y 1962. Muchos de estos polígonos se establecieron en áreas marinas, tales como atolones.

La precipitación radiactiva debida a los ensayos de explosivos nucleares representa una fuente de exposición continua a las radiaciones, incluso en la actualidad aunque a niveles mucho más bajos que al momento de las pruebas. 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.

Otra fuente militar de particular importancia para los mares es el uso de la energía nuclear para la propulsión de navíos militares, tanto de superficie como submarinos.

Han ocurrido muchas perdidas de buques que han sido sumergidos con toda su carga radioactiva en el fondo de los mares.

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.

II.3.3. Las Fuentes Médicas de Radiación

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.

II.3.4. La Radiación Proveniente de la Generación Núcleo-eléctrica

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.

II.3.5. La Radiación debida a Accidentes en Centrales Nucleares

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 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.

El impacto radiológico del accidente de la Central de Fukushima-Daiichi esta aún sujeto a la evaluación internacional.

II.3.6. Resumen de los Niveles Globales de Radiación

El Cuadro siguiente presenta las estimaciones más recientes de las dosis de radiación global, incluidos los de la energía nuclear, llevadas a cabo por el UNSCEAR:

Cuadro 1

Dosis media anual e intervalos de dosis individuales de radiation ionizante por fuente

(Milisieverta)

Fuente a tipo de exposicion	Dosis media anual mundial	Intervalo tipico de las dosis individuales	Observaciones
Fuentes de exposiciOn naturales InhalaciOn (gas radon)			

RadiaciOn terrestre externa

Ingestion

RadiaciOn cOsmica

Total natural

1,26	0,2-10
0,48	0,3-1
0,29	0,2-1
0,39	0,3-1
2,4	1-13

La dosis es muy superior en algunas viviendas.

La dosis es superior en algunos lugares.

La dosis aumenta con la altitud.

Grupos de poblacion importantes reciben entre 10 y 20 milisievert (mSv).

Fuentes de exposiciOn artificiales

Diagnostic ^o medico (excluida la terapia)	0,6	0—varias decenas.	La media correspondiente a distintos niveles de atencion medica oscila entre 0,03 y 2,0 mSv; la media en algunos paises es superior a la de la exposiciOn a fuentes naturales; la dosis individual depende del tipo de examen aplicado.
Ensayos nucleares en la atmOsfera	0,005	Pueden producirse algunas dosis mas alias en las inmediaciones de los poligonos en 1963.	La media ha disminuido despues del valor maxim ^o de 0,11 mSv registrado
ExposiciOn profesional			

Accidente de Chernobyl

Ciclo del combustible nuclear (exposición de la población)

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).

0,002

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.

0,0002b

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 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.
------------------	-----	--	--

Unidad de medida de la dosis efectiva.

Radionuclidos 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 radionuclidos de período largo, dispersos a nivel mundial, liberados

durante la relaboración del combustible nuclear y el funcionamiento de las centrales nucleares.

II.4. EFECTOS BIOLÓGICOS DE 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 Asamblea General de las Naciones Unidas. 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.

II.4.1. 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. El daño se expresa como cambios en el ADN que constituyen los genes contenidos en los cromosomas alojados en el núcleo celular. Estos cambios son denominados mutaciones.

Cuando ocurre una mutación radio-inducida en una célula madre, se altera la información que pasa de la 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 el daño remanente o mal reparado puede acarrear consecuencias para la célula y su descendencia.

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 para la ciencia universal. 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, 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 caso, si una

fracción de las mutaciones se mantiene sin reparar, el número esperado de células mutadas será proporcional a la dosis.

II.4.2. Daño Celular Radio-inducido

II.4.2.1 Muerte celular: 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 descrita), 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 titulares". 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".

II.4.2.2. Transformación celular: 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 como "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..

II.4.3. La Radio-inducción de Cáncer

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.

UNSCEAR ha informado que 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, como se verá a continuación, 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.

II.4.3.1. 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).

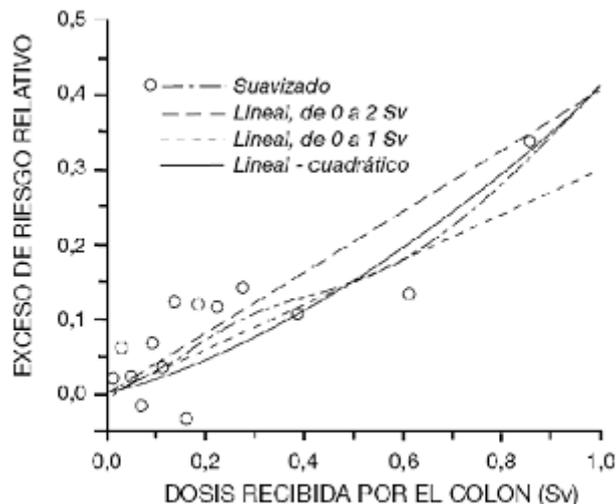
La información epidemiológica sobre la incidencia del cáncer asociada con las radiaciones proviene de los estudios realizados con los sobrevivientes de las bombas atómicas lanzadas en el Japón, grupos expuestos a radiaciones en el entorno laboral, personas que reciben radiaciones durante tratamientos 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, UNSCEAR 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. UNSCEAR utilizó esos datos 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.

II.4.3.2. Cuantificación del Riesgo

UNSCEAR utilizó los datos epidemiológicos 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 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 siguiente 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.



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

(Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation — 2006 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes A and B, vol. I (ONU, núm.: E.08.IX.6 y corrección), anexo A, fig. IX.)

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. UNSCEAR ha 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 del UNSCEAR 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.

Exceso de riesgo de mortalidad de por vida (promedio de sexos)

(El exceso de riesgo a lo largo de la vida de un 1,0% equivale a un nuevo caso por cada 100 personas)

(Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation — 2006 Report to

the General Assembly, with Scientific Annexes A and B, vol. I (ONU, núm.: E.08.IX.6 y corrección), anexo A, párr. 593.)

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

II.4.4. 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. UNSCEAR ha 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. El UNSCEAR 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 uno años, UNSCEAR revisó sus 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, UNSCEAR logró presentar no solo una nueva estimación del

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

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.

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

(Hereditary Effects of Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation — 2001

Report to the General Assembly, with Scientific Annex (ONU, núm.: E.01.IX.2), anexo, cuadro 46.)

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

II.4.5. 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.

II.4.6. 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 USCEAR 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 UNSCEAR seguirá manteniendo bajo examen las novedades que se produzcan al respecto.

UNSCEAR también realizó una evaluación de los efectos de la radiación ionizante 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.

Por último, como se indicó antes, el UNSCEAR ha observado que 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, el UNSCEAR seguirá vigilando y examinando los nuevos resultados que se obtengan en las investigaciones en ese campo. 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 circunstanciales, 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.

II.4.7. Resumen de los riesgos de efectos estocásticos derivados de la exposición a las radiaciones

En resumen, sobre la base de los estudios epidemiológicos disponibles en seres humanos expuestos a dosis de radiación relativamente alta se puede colegir lo siguiente:

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

- 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,
- 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 la primera generación debido a la exposición a dosis bajas es:

- para los efectos dominantes (como la función X-enfermedades alineados) ~ 750 a 1 500 por millón de habitantes en relación vis-à-vis con una frecuencia inicial de 16 500 por millón;
- para las enfermedades crónicas multifactoriales ~ 250 a 1 200 por millón de habitantes en relación vis-à-vis con una frecuencia inicial de 650 000 por millón, y,
- para las anomalías congénitas ~ 2 000 por millón de habitantes en relación vis-à-vis con una frecuencia inicial de 60 000 por millón (los efectos cromosómicos se supone que son subsumidos en parte bajo el riesgo de enfermedades autosómica dominante y ligada al cromosoma X- y en parte en virtud de 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 estiman entre 3.000 y 4.700 casos por cada gray por cada millón de descendientes, lo que constituye 0,4 a 0,6 por ciento de la frecuencia de base de los trastornos hereditarios en la población humana.

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. Los efectos estocásticos se extienden durante períodos de tiempo muy

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

Teniendo en cuenta las estimaciones de UNSCEAR y sus propias comprobaciones, la ICRP recomienda el uso de coeficientes de riesgo nominales ajustados al detrimento con el único propósito de la protección radiológica. Estos coeficientes son números expresados en % por unidad de dosis, que - multiplicados 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

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

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, e incluyen la cuantificación de la expectativa plausible de daño, e 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 por la ICRP son las siguientes:

Coeficientes nominales de riesgo ajustados al detrimento¹

(expresados en 10^{-2} Sv⁻¹)

para efectos estocásticos después de exposición a radiación a tasa de dosis baja

(en comparación a los de hace más de una década [Pub. 60]).

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.

Las normas internacionales de seguridad radiológica han tomado las estimaciones UNSCEAR y las recomendaciones de la ICRP y han redondeado un coeficiente nominal genérico de riesgo de $\sim 5\% \text{ Sv}^{-1}$, como base de los requisitos para limitar los riesgos de la radiación. 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, tanto el UNSCEAR como la ICRP han dejado 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.

II.4.8. Inferencia de riesgos y atribución de efectos potenciales a la salud derivados de la exposición a las radiaciones

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 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. 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 puede aclarar uno de los mayores enigmas en las ciencias de la radiación: si los riesgos de radiación solo deben inferirse y sobre que base efectos asociados a la radiación pueden ser atribuibles a una situación específica de exposición a la radiación.

Mientras que la inferencia de riesgo de radiación está asociada al concepto que en inglés se denomina probability y en castellano probabilidad, la atribución de efectos de la radiación debe basarse en el concepto que en

inglés se denomina provability y que en castellano también se denomina probabilidad, lo que es una gran causa de confusión lingüística; el termino mas cercano (aunque no sinónimo) de la probabilidad/provability es el de demostrabilidad.

Los conceptos de probabilidad/probability y probabilidad/provability son sutilmente diferentes. La probabilidad/probability es una magnitud caracterizable e inferible a través de técnicas estadísticas y de métodos bayesianos formales. Por el contrario, la probabilidad/provability es una magnitud no cuantificables que describe la capacidad de demostrar, mediante pruebas de lógica contra-fáctica y métodos diagnósticos o epidemiológicos atestables la incidencia real de efectos de la radiación.

Sobre la base de la evidencia disponible, el UNSCEAR acaba de dilucidar las nociones de inferencia de riesgo y atribución de efectos deberían ser dilucidados. El Comité abordó el tema de la atribución de efectos inferencia de riesgos a la salud a diferentes niveles de exposición a radiación y llegó a las siguientes conclusiones:

- Un efecto observado en la salud de una persona podría atribuirse inequívocamente a la exposición a radiaciones si sufriera reacciones tisulares (con frecuencia denominadas efectos “deterministas” o “determinísticos”) y si se pudiera hacer un diagnóstico patológico diferencial que descartara otras posibles causas. Esos efectos deterministas son causados por altas dosis absorbidas agudas de irradiación (es decir, de alrededor de 1 gray como mínimo), como las que podrían producirse por exposición en accidentes o en radioterapia;
- Otros efectos conocidos vinculados a la exposición a radiaciones en la salud, como los tumores malignos inducibles por irradiación (los llamados efectos “estocásticos”) no pueden atribuirse inequívocamente a la exposición a radiaciones porque esa no es la única causa posible y, actualmente, en general no se dispone de marcadores biológicos específicos de la exposición a radiaciones. Así pues, en ese caso no es posible hacer un diagnóstico patológico diferencial inequívoco. Solo si la incidencia espontánea de una clase de efecto estocástico en particular fuera baja y la radiosensibilidad a un efecto de esa clase fuera alta (como en el caso de algunos cánceres de tiroides en los niños) sería posible atribuir a la exposición a radiaciones un efecto en una persona en particular, especialmente si la exposición fuera alta. Pero, aun así, el efecto padecido por una persona no puede atribuirse inequívocamente a la exposición a radiaciones debido a la posibilidad de que existan otras causas;

- Una mayor incidencia de efectos estocásticos en una población podría atribuirse a la exposición a radiaciones mediante un análisis epidemiológico, siempre y cuando, entre otras cosas, la mayor incidencia de casos de efectos estocásticos fuera suficiente como para superar la incertidumbre estadística intrínseca. En ese caso, el aumento de la incidencia de efectos estocásticos en la población expuesta podría verificarse adecuadamente y podría atribuirse a la exposición. Si la incidencia espontánea del efecto en una población fuera baja y la radiosensibilidad al efecto estocástico pertinente

fuera alta, el aumento de la incidencia de efectos estocásticos por lo menos podría relacionarse con la radiación aunque se tratara de un número pequeño de casos;

- 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, y una razón para esto es la gran fluctuación que existe en la incidencia espontánea de esos efectos;

- Pueden utilizarse especímenes de ensayos biológicos especializados (por ejemplo, muestras hematológicas y citogenéticas) como indicadores biológicos de la exposición a la radiación incluso con niveles muy bajos de exposición. No obstante, la presencia de esos indicadores biológicos en las muestras tomadas a una persona no significa necesariamente que la persona padecerá efectos nocivos para la salud debido a la exposición;

- En general, el aumento de la incidencia de los efectos en la salud de la población no puede atribuirse con seguridad a exposición crónica a niveles de radiación típicos del promedio mundial de radiación de fondo. Esto se debe a la incertidumbre de la evaluación de los riesgos que entrañan las dosis bajas, al hecho de que actualmente no existan marcadores biológicos específicos de las radiaciones en relación con los efectos en la salud y al insuficiente poder estadístico de los estudios epidemiológicos. En consecuencia, el UNSCEAR no recomienda multiplicar dosis muy bajas por grandes números de personas para estimar el número de efectos en la salud inducidos por la radiación en un grupo expuesto a dosis incrementales sobre la radiación de fondo a niveles aproximados a los naturales;

- El UNSCEAR hizo notar que los organismos de salud pública deben asignar recursos de manera apropiada y que para eso tal vez tengan que hacer proyecciones del número de efectos en la salud a fin de realizar

comparaciones. Ese método, si bien está basado en supuestos razonables, aunque no verificables, podría ser útil para esos fines siempre y cuando se aplicara en forma sistemática, se tuviera en cuenta plenamente la incertidumbre de las evaluaciones y se infiriera que los efectos en la salud proyectados fueran hipotéticos.

CAPITULO III

RADIOACTIVIDAD NATURAL DE LOS MARES III.1. RADIOACTIVIDAD INNATA EN LA INMENSIDAD MARINA

Los océanos exhiben radioactividad principalmente debida a un inventario de sustancias radiactivas existente e innato, de origen primigenio o primordial, que existe desde la génesis terráquea. Este inventario se altera dinámicamente en el tiempo por insumos radiactivos procedentes de diversas fuentes de la naturaleza misma y de entradas procedentes de fuentes antropogénicas. Parte de la radioactividad del mar se mantiene disuelta en las aguas de mar, parte se incorpora a la flora y fauna marina, y parte sedimenta y se acumula en los fondos marinos, ya sea en la parte inferior de la profundidad del océano o a la plataforma continental.

Las aportaciones de la naturaleza son causadas por fenómenos tanto de características permanentes: por ejemplo los ríos, las costas marítimas y la atmósfera aportan continuamente radionucleidos naturales a los océanos. Otras aportaciones son la consecuencia de fenómenos estocásticos, como por ejemplo los provenientes de las erupciones volcánicas. Algunas aportaciones naturales comenzaron o se agravaron con la aparición de los seres humanos y se han incrementado con el desarrollo social: por ejemplo, la erosión costera es un contribuyente de radionucleidos naturales a los mares y se incrementó como resultado del hábitat humano.

Es así que los océanos contienen gran cantidad de elementos radioactivos naturales que forman parte de un gran número de sustancias, algunas disueltas en las aguas del mar, otras formando parte de la biota marina y otras depositadas en los sedimentos oceánicos. Grandes cantidades de estos elementos también están en tierra, como compuestos del suelo y de la biota terrestre, y en la atmósfera; una fracción de este inventario radiactivo no-marino es arrastrado lenta pero permanentemente hacia los océanos.

Para cuantificar este vasto inventario radiactivo natural de los mares es imprescindible en primer lugar cuantificar el ciclo del agua en la Tierra. El

agua del océano cubre el 70 % de la superficie de la tierra y domina el balance de agua de la Tierra. Los océanos contienen el 97,5 % del agua del planeta, la tierra el 2,4%, y el ambiente tiene menos del 0,001 %. El balance del agua del planeta es el siguiente: los océanos, 97,5 %; hielos, 1,8 %; agua subterránea, 0,6 % ; cursos de agua y lagos, 0,009 %; humedad del suelo, 0,008 %; atmósfera, 0,001 %, y, biomasa, 0,0001 % (el balance de agua dulce es el siguiente: hielo, 74 %; agua subterránea, 26 %; cursos de agua y lagos, 0,4 %; humedad del suelo, 0,4 %; atmósfera, 0,04 % , y, biomasa, 0,004 %).

Es así que los océanos del mundo contienen 1,35 10¹⁸ m³ de agua, de estos 361 10¹² m³/año se evaporan en los 0.013 10¹⁵ m³ de agua contenida en la atmósfera; de esta, 324 10¹² m³/año precipita de nuevo en el mar y 99 10¹² m³/año precipita hacia la tierra en el 33,6 10¹⁵ m³ de agua contenida en la tierra; de este 62 10¹² m³/año se evapora y transpira de nuevo a la atmósfera y 37 10¹² m³/año regresa a los océanos como escorrentía y aguas subterráneas.

En suma, el inventario radiactivo de los mares se encuentra contenido en un exámetro cúbico de agua y se repone por radionucleidos contenidos en una treintena de gigámetros cúbicos de agua que vienen de vuelta a los océanos desde la tierra y por los que caen de la atmósfera con el alrededor de un tercio de pentámetros cúbicos de agua que precipita en los océanos. La radioactividad de los mares está disuelta en esta monumental cantidad de agua, la que contiene en peso un promedio de 3,5 por ciento de sólidos disueltos. Los constituyentes químicos más importantes, en orden decreciente, son cloruro, sodio, sulfato, magnesio, calcio, potasio, bromo, y bicarbonato.

III. 2 RADIONUCLEIDOS PRIMIGENIOS O PRIMORDIALES

Los radionucleidos primordiales en el inventario existente incluye principalmente (por orden de contenidos) los radionucleidos potasio-40 y rubidio-87 y los radionucleidos de las llamadas series de desintegración primordial que encabezan los uranios-238 y -235 y el torio-232. Los radionucleidos cosmogénicos carbono-14, berilio-7 e hidrógeno-3 (tritio) se han venido precipitando sin fin desde la atmósfera sobre los mares y forman parte del inventario mares. Otros radionúclidos primordiales de larga vida media que se encuentran en los mares son el lantano-138, ¹³⁸La (1,05 1.011 años), el sumerio-147, ¹⁴⁷Sm (1,06 1.011 años) y el lutecio 176, ¹⁷⁶Lu (3,78 1.010 años) pero su actividad es insignificante frente a los demás.

Las sustancias radiactivas primordiales generalmente se denominan 'naturales'. Por el contrario, las sustancias radiactivas procedentes de fuentes antropogénicas se describen generalmente como 'artificiales', a pesar de que podrían estar constituidas por radionucleidos 'naturales'. A pesar de los problemas semánticos causados por la falsa dicotomía presentada por la adjetivación 'natural' frente a 'artificial', el inventario existente innato de radionucleidos naturales, así como los insumos radiactivos de la naturaleza en los océanos suelen clasificarse como 'naturales' pero las descargas de radionucleidos 'naturales' por actividades que directa o indirectamente están asociadas al devenir humano son clasificados como 'artificiales'.

Aunque estas características "naturales" de los océanos no deben utilizarse para justificar las descargas de elementos radiactivos antropogénicas en el mar, su cuantificación puede proporcionar una perspectiva para el juicio

II.2.1. Los Radionucleidos Naturales Profusos

Los radionucleidos naturales mas abundantes en los océanos incluyen el ^{40}K , ^{87}Rb , y la llamada series de desintegración primordial encabezada por el ^{238}U , el ^{235}U y el ^{232}Th y, obviamente, sus productos de desintegración.

III.2.2. El Potasio

El elemento potasio (K) es muy abundante en la hidrosfera. Es el séptimo elemento más abundante en la Tierra y representa aproximadamente el 1,5 % de su peso en la corteza. Es demasiado reactivo como para ser encontrado no combinado en la naturaleza. Aunque las rocas ígneas, esquistos, y los sedimentos son minerales que contienen la mayor parte del potasio que se encuentra en la naturaleza, los mares son muy ricos en potasio.

En virtud de su amplia distribución, los radioisótopos del potasio representan la radiactividad natural más abundante del mar, fundamentalmente debida al isótopo potasio-40, ^{40}K .

Hay 24 isótopos conocidos del potasio, tres de ellos primordiales: ^{39}K (93,3 %), ^{40}K (0,0117 %) y ^{41}K (6,7 %). El ^{39}K y ^{41}K son isótopos estables, que en conjunto comprenden 99,99 por ciento del elemento. La radiactividad natural de potasio es debido a la radiación que emite el isótopo ^{40}K , que está presente en el elemento en la naturaleza en la medida de aproximadamente 0,01 por ciento. El ^{40}K tiene una vida media de 1.277×10^9 años y decae a ^{40}Ar el que por captura de electrones y por emisión de

positrones decae a ^{40}Ca estable. (El decaimiento de ^{40}K a ^{40}Ar permite emplear un método de datación comúnmente usado para la datación de minerales marinos y terrestres). Su abundancia en el agua es de 416000 ppb en peso, y de 65.800 ppb por átomos. Para el total del volumen de los océanos de aproximadamente $1.4 \cdot 10^{21}$ litros, la actividad total de ^{40}K es de aproximadamente ¡1022 bequerels!, una cantidad monumental de radioactividad.

El potasio es un ingrediente esencial en todas las formas de vida en el mar donde cada organismo mantiene un nivel de potasio y una relación potasio/sodio relativamente fija. En los seres vivos el ^{40}K representa la mayor fuente de radiactividad, mayor incluso que la debida al ^{14}C ; por ejemplo en un cuerpo humano de 70 kg de masa, se desintegran por segundo aproximadamente 4.400 núcleos de ^{40}K . El contenido de potasio de las plantas varía considerablemente, normalmente en el intervalo de 0,5 a 2 por ciento. El potasio es el catión inorgánico primario dentro de la célula viva, y es uno de los cationes más abundantes en los fluidos extracelulares. En el hombre, la relación de potasio entre la célula y el plasma es de aproximadamente 27:1. El contenido de potasio del tejido muscular es de aproximadamente 0,3 por ciento, mientras que la de suero de la sangre es aproximadamente 0,01 a 0,02 por ciento.

III.2.3. El Rubidio

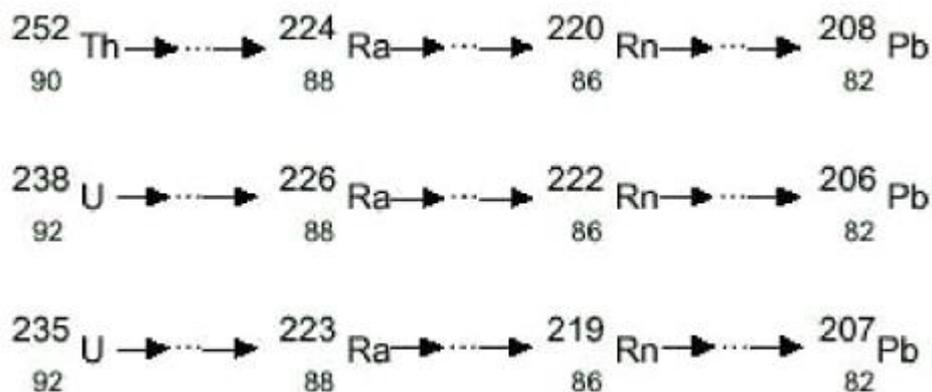
Otro componente importante del inventario radiactivo de los mares es un isótopo del rubidio (Rb), el rubidio-87 (^{87}Rb). El elemento rubidio es mucho más abundante en la naturaleza de lo que se pensaba hace unos años. En la actualidad se considera que es un metal abundante de la corteza terrestre, aproximadamente tan abundante como el zinc y más común que el cobre, constituyendo alrededor del 0,01 por ciento de la corteza.

El rubidio se encuentra con frecuencia en el mar, en aguas naturales surgentes, y en rocas graníticas. El rubidio se presenta como una mezcla de dos isótopos: el ^{85}Rb (72,15 por ciento) y el ^{87}Rb radioactivo (27,85 por ciento). Por otra parte se han podido preparar 15 isótopos radiactivos artificiales del rubidio, del ^{79}Rb al ^{95}Rb .

El ^{87}Rb tiene una vida media de $4,88 \cdot 10^{10}$ años y se desintegra en estroncio-87 estable mediante la emisión de radiación beta; propiedad que se ha utilizado ampliamente en la datación de rocas. El rubidio es altamente reactivo, con propiedades similares a otros elementos en el grupo de los metales alcalinos tales como la oxidación rápida.

III.2.4. Las Series Primordiales

Las series de radioisotopos de desintegración primordial incluyen los componentes de tres series de desintegración radiactiva definidas por sus 'cabezas' o 'padres' de más larga vida, el ^{238}U , ^{232}Th y ^{235}U , respectivamente. Estos radioisótopos tienen muy larga vida media y amplia distribución en toda la tierra y el mar y se desintegran formando una serie de hijas que a su vez son radiactivas. Cada serie finalmente termina en un isótopo del plomo estable. Lo más interesante es la serie del uranio-238, que se desintegra a través de una cadena que contiene 8 desintegraciones alfa y 6 beta decayendo a plomo 206. Esta cadena incluye los isótopos mas longevos de radio y radón: el radio-226 y el radón-222, respectivamente. El cuadro siguiente presenta simplificadaamente las tres series primordiales y sus radioisótopos mas significativos.



Los radionucleidos de las series primordiales se encuentran naturalmente en el aire, agua y suelo. Son comunes en las rocas y en el fondo de los océanos y, obviamente, se encuentran diluidos en las aguas marinas.

En cada una de las tres cadenas del núcleo padre tiene una vida mucho mayor que lo hace cualquiera de la progenie. Por lo tanto, se establece un estado de equilibrio en el que, para una muestra dada de material, cada miembro de la serie tiene la misma actividad, para cada uno de la serie, la actividad total en un promedio corteza terrestre aproximadamente $1015\text{Bq}/\text{km}^3$.

Siempre y cuando todos los miembros de las series primordiales se mantengan en el volumen cerrado de los océanos, eventualmente alcanzarán un estado en el que todos sus componentes decaerán con el mismo número de desintegraciones por segundo debido a que la vida media de la primera desintegración es larga relativamente a las desintegraciones posteriores. Este estado se llama de equilibrio secular, y continuará indefinidamente a menos que una parte del material se escapa del volumen, o se añada material adicional.

III.3. INVENTARIO PRIMORDIAL

Mientras que las series primordiales son las principales contribuyentes al inventario radiactivo de la corteza terrestre, que como se indicó, en promedio, presenta una densidad de actividad de aproximadamente 10^{15} Bq/km³, la radiactividad de los mares está dominada por el potasio-40 y en menor medida por el rubidio-87.

Para los océanos como un todo, con un volumen total de agua de alrededor de $1.35 \cdot 10^{18}$ m³, de los cuales $6,5 \cdot 10^{17}$ m³ corresponden al Océano Pacífico y $3 \cdot 10^{17}$ m³ al Océano

Atlántico, el inventario radioactivo primordial total se estima en aproximadamente más de 10^{22} Bq.

El Cuadro siguiente presenta un resumen sucinto del inventario de la radioactividad natural primigenia de los mares, y contiene datos provenientes de la publicación Radiactividad en el medio marino de la Academia Nacional de Ciencias de los EEUU. Para decirlo en términos sencillos: La radioactividad natural de los océanos es inconmensurable; es mayor a 10^{22} Bq!, es decir 10 seguido de 22 ceros Bq; es equivalente a la radioactividad de 10.000.000.000.000.000.000.000 Kg de bananas!

Radioactividad Natural en los Océanos				
Nucleido	Actividad por unidad de volumen de agua	Actividad total oceánica		
		Océano Pacífico	Océano Atlántico	Todos los océanos
Uranio	33 mBq/L	22 10¹⁸Bq	11 10¹⁸Bq	41 10¹⁸Bq
Potasio 40	11 Bq/L	7400 10¹⁸Bq	3300 10¹⁸Bq	14000 10¹⁸Bq
Tritio	0.6 mBq/L	0,37 10¹⁸Bq	0,19 10¹⁸Bq	0,74 10¹⁸Bq
Carbono 14	5 mBq/L	3 10¹⁸Bq	1.5 10¹⁸Bq	6.7 10¹⁸Bq
Rubidio 87	1.1 Bq/L	700 10¹⁸Bq	330 10¹⁸Bq	1300 10¹⁸Bq

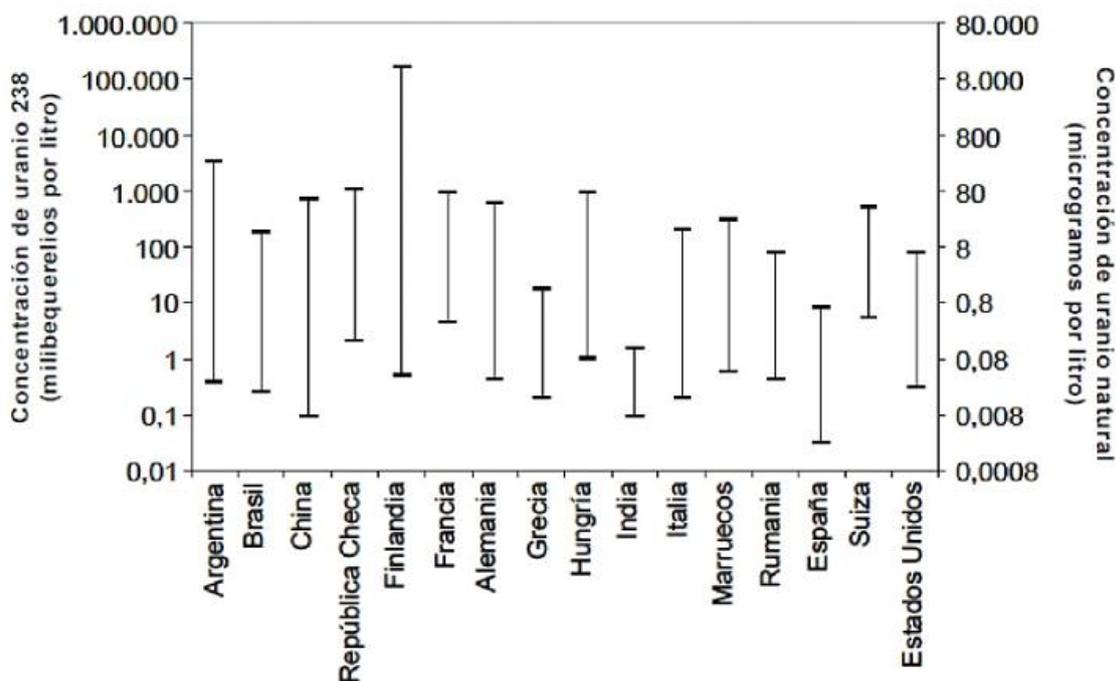
En resumen, el inventario parcial de radionucleidos naturales en agua de mar asciende a alrededor de 1022 Bq, sin incluir las hijas del uranio y el torio de las series primordiales. Esta memoria demostrará que este portentoso nivel de actividad es extremadamente mayor en que la de los antropogénicos. En efecto, hay cerca de 7 órdenes de magnitud de diferencia entre la radioactividad artificial resultante de fuentes antropogénica y el inventario natural.

III.4. DESCARGAS NATURALES

El enorme inventario radiactivo existente de los mares se aumenta de forma continua por entradas crónicas de sustancias radioactivas naturales, mediante descargas producidas por la naturaleza. Las principales fuentes de estos insumos radiactivos "naturales" en los océanos son los flujos de agua, la erosión costera, las erupciones volcánicas y la lluvia que contribuye a las descargas mediante el lavado del aire por encima de los mares y la consiguiente caída e ingreso de radionúclidos atmosféricos, principalmente los de carácter cosmogónico .

III.4.1. Entradas por drenajes, escorrentías y escurrimiento

Con el fin de evaluar la cantidad de radionucleidos que se introducen en los océanos por drenajes de cursos de agua, escorrentía y escurrimiento de aguas subterráneas, sería necesario para evaluar los diferentes flujos de agua y la concentración de los diversos radionucleidos en estas aguas. Se debe reconocer que tal concentración varía enormemente, en varios órdenes de magnitud, entre los diferentes cursos de aguas. Sin embargo, sólo a los efectos de las comparaciones una estimación total bruta se puede obtener por el producto de la media de escorrentía de alrededor de 10^{13} - 10^{14} m³/año y la concentración media de los principales elementos naturales en las aguas. Las concentraciones de los radionúclidos naturales en el medio ambiente son muy variables y las aguas no son una excepción. Esta variabilidad en la radioactividad natural de las aguas ha sido investigada por UNSCEAR, el que solo para el uranio natural ha estimado una variabilidad de casi seis órdenes de magnitud. Por ejemplo, el cuadro siguiente presenta la variabilidad observada de las concentraciones de uranio natural en el agua potable de algunos países. Es fácil apreciar que a pesar que las entradas anuales naturales de radioactividad a los mares son impresionantes, aun son equivalentes a una minúscula fracción del inventario existente.



III.4.2. Entrada por erosión

Otra causal de entrada de radionucleidos naturales al mar es la erosión costera oceánica. Una fracción de los sedimentos del desgaste costero, la eliminación de playas y dunas costeras, eventualmente entra en los océanos. La causa de la erosión costera es principalmente natural, pero también puede ser provocada por el hombre. La erosión puede tomar la forma de pérdidas a largo plazo de sedimentos y rocas, o simplemente la redistribución temporal de los sedimentos costeros, es decir la erosión en un lugar puede dar lugar a acumulación en las inmediaciones.

Las causas naturales de la erosión incluyen acción de las olas, las corrientes de marea, las corrientes de onda, o el drenaje, con el material removido terminando en los océanos. Las olas generadas por las tormentas y el viento es una de las principales causas de la erosión costera. Los cuatro tipos principales de acción de las olas son de acción hidráulica, desgaste, corrosión o abrasión y corrosión o solución.

La acción hidráulica se produce cuando las ondas chocan contra la pared del acantilado, comprimiendo el aire en las grietas de la pared del acantilado, produciendo una enorme presión sobre la roca circundante, expandiendo el aire de forma explosiva, y forzando la roca a trozarse. Con el tiempo, el acantilado cara grieta crece, a veces formando una cueva, la roca del acantilado cae al fondo del lecho marino y se somete a la acción de las olas. El desgaste se produce cuando el mar muele rocas juntas, haciendo que se vuelvan más suaves y de tamaño reducido. Como el pedregal se mueve de lado a lado causando que las piezas se choquen unas a otras convirtiéndose en tamaños reducidos, alisados y redondeados. Además de chocar con otros pedregales, el pedregal también colisiona con la base acantilado causando que pedazos de roca caigan a la base del acantilado.

La corrosión o abrasión se produce cuando las olas rompen en la pared del acantilado golpeando la pared del acantilado erosionándolo poco a poco. Por último, la corrosión o solución se produce cuando las aguas del océano corroen las rocas de la pared del acantilado. Por lo general, el acantilado en gran medida es erosionado de esta manera es el acantilado de piedra caliza, que tienen un pH alto.

Otra causa natural principal de la erosión en muchos lugares es el aumento relativo del nivel del mar y las tormentas. La erosión está, por lo tanto, muy ligada a la tendencia actual de calentamiento global y el consecuente aumento del nivel del mar. Los cambios en el nivel relativo del mar son diferentes en diferentes lugares, pero se estima que aproximadamente 106 m² de secanos costeros están siendo pasivamente sumergidos por año como consecuencia del aumento relativo del nivel del mar. De hecho, la

contribución al retroceso de la costa del aumento relativo del nivel del mar puede ser mayor en algunas áreas que la erosión causada por la acción del oleaje.

Una causa importante de la erosión inducida por el hombre es la interrupción de las fuentes y transporte de sedimentos. Los ejemplos incluyen el blindaje de las fuentes de sedimentos con diques, muros de contención, y los mamparos, y la interrupción del transporte de sedimentos por la construcción de espigones y muelles. Las olas generadas por movimiento de las embarcaciones a motor, también causan la erosión costera.

La entrada natural de los radionucleidos en los mares debido a la erosión podría, en principio, calcularse multiplicando la cantidad estimada de tierras erosionadas por una actividad promedio estimada por unidad de masa del suelo. Esto requeriría una estimación de la longitud total de costa erosionada. Esto no es simple debido a que la longitud medida de un tramo de costa depende de la escala de medición, aunque el total se estima en 109 metros. Por pequeña que sea la erosión, dada las actividades promedio de radionucleidos naturales en los suelos, la cantidad de sustancias radiactivas que entra a los mares como resultado de la erosión costera es inmensa.

III.4.3. Aportaciones de las erupciones volcánicas

La mayoría de los volcanes están situados en el fondo oceánico y los materiales que descargan sus erupciones entran directamente al agua de mar.

La precipitación en los océanos desde el aire del material producido por una erupción volcánica en la tierra, el que se denomina tefra (del griego ceniza) o piroclasto (del griego πῦρ "fuego" y κλαστός "roto"), es otra fuente de ingreso natural de sustancias radioactivas en los océanos. La cantidad de tefra que ha precipitado en los océanos ha sido colosal.

Es muy difícil, sin embargo, evaluar incluso un cálculo aproximado del volumen de tefra que entra en los océanos por unidad de tiempo ya sea directamente de los volcanes debajo de la mar o indirectamente, como precipitación de las erupciones de los volcanes en tierra. Es aún más complicado evaluar la fracción de tefra que se disuelve en las aguas oceánicas y la fracción que se deposite en el fondo del mar. Se estima que al menos 103 m³ al año de tefra se introduce en los océanos.

Hay muchas mediciones de radiactividad en diversos tefras de todo el mundo. III.5 COMPARACIONES

La utilización del inventario radioactivo natural y las descargas naturales como elemento de comparación con las recargas e inventario antropogénico debe ser tomada con cautela. Por una parte, la distribución de los nucleidos artificiales puede estar muy localizada. Por otra parte, el inventario natural no es homogéneo. Por ejemplo, el uranio y su importante hija el radio son bastante solubles en el agua de mar, pero el torio es casi insoluble. Otra hija de las cadenas primordiales, el radón, es un gas noble que es soluble en agua pero puede escapar a la atmósfera.

También existen diferencias espaciales ocasionadas por los distintos decaimientos de los componentes de las series primordiales. Por ejemplo, en el Océano Pacífico oriental, los perfiles de profundidad muestran proporciones inferiores a uno para las actividades de ^{238}U , y de su hija el ^{234}Th , esto significa que parte del ^{234}Th se ha unido a partículas que han sido retiradas de la zona. Por encima de la termoclina a 100 metros existe una capa de agua rica en partículas, que muestran un aumento en la relación $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ que se refleja por un decrecimiento en la relación de material disuelto. Estas partículas contienen adsorbido ^{234}Th que se transporta a la zona de sedimentación de las partículas. El ^{238}U es longevo y es soluble en agua de mar, y se mantiene a una concentración constante en profundidad; la hija ^{234}Th tiene una vida media corta, unos 24 días, y es muy probable que se adhieran a cualquier partícula cercana, incluyendo los desechos orgánicos que participan en los ciclos biogeoquímicos en el océano. Por esa razón, es menor en la actividad que su ^{238}U matriz cerca de la superficie. Como las partículas caen a través del agua arrastran al ^{234}Th , el que tienden a acumularse en la profundidad, de manera que la actividad ^{234}Th es notablemente más alta en donde las partículas son más abundantes. Y este es solo un ejemplo de la compleja dinámica de la radioactividad natural de los mares

A pesar de que todas estas alteraciones del inventario natural, es evidente que es ciclópeo, órdenes de magnitud mayor que el inventario antropogénico

Es así que las comparaciones entre las entradas de los radionucleidos artificiales en los mares y los insumos aportados por la naturaleza, y más aún las comparaciones entre el inventario antropogénico acumulada a lo largo de las últimas décadas y el enorme inventario natural existente, pueden ser malinterpretadas. Como la organización no

gubernamental Greenpeace ha subrayado correctamente, aunque el 98 % de la radiactividad en el mar se atribuye a fuentes naturales, esto le da una perspectiva engañosa sobre el significado de los radionucleidos artificiales en los sistemas marinos. El comportamiento biológico de muchas de nucleidos artificiales no se entiende completamente. Muchos de los modelos para los cálculos de dosis podrían no tener debidamente en cuenta las propiedades químicas y bioquímicas de los radioisótopos , además de sus propiedades radiológicas. Además, las entradas de los radioisótopos artificiales procedentes de la industria nuclear o de actividades militares son a menudo muy localizadas, con una entrada de fuente puntual en lugar de los aportes difusos asociados a los radionucleidos naturales.

A pesar de estas advertencias, las comparaciones de los cambios naturales de la naturaleza frente a los cambios antropogénicos de la naturaleza pueden ofrecer alguna perspectiva útil para la toma de decisiones.

CAPÍTULO IV

RADIOACTIVIDAD ANTROPOGÉNICA DE LOS MARES

IV.1 INTRODUCCIÓN

Con la irrupción del homo sapiens, algunas actividades humanas alteraron el hábitat mediante la eliminación y dispersión de materiales, generalmente residuales, tanto inorgánicos como biológicos. Estos materiales muchas veces contienen sustancias radioactivas y muchas de ellas llegan eventualmente al mar.

Es así que la sociedad humana ha contribuido a acrecentar el inventario radioactivo de los mares. Lo ha hecho arrojando, directa o indirectamente materiales residuales conteniendo radionucleidos tanto naturales como artificiales.

El desarrollo de las empresas humanas ancestrales, como la agricultura y la minería, facilitó procesos que eventualmente facilitarían la llegada a los océanos de radiactividad natural pero antropogénica. A medida que la sociedad evolucionó grandes cantidades de radionucleidos naturales comenzaron a moverse por los procesos industriales y muchos de ellos terminaron en el mar; ejemplos notables son los residuos radioactivos naturales resultantes del procesamiento de roca fosfórica, y las escalas que se acumulan en el interior de las tuberías de la industria del petróleo cercana a la costa y en el mar. Es difícil definir después de qué momento de

la evolución humana estas entradas de radiactividad natural deben ser consideradas 'artificiales'.

Al inventario de radioactividad natural de los mares se suma la radioactividad incorporada por las actividades humanas, la así llamada radioactividad artificial. El mayor contribuyente a la radioactividad artificial de los mares es el legado de la guerra fría. Este legado incluye la radioactividad residual proveniente de: 2408 'experimentos' (ensayos y pruebas de seguridad) de bombas nucleares, la producción de material fisiónable bélico, barcos y submarinos nucleares, faros nucleares de uso bélico, satélites militares, fuentes radioactivas para uso militar, y munición convencional que utiliza materiales radioactivos, tales como la munición de uranio empobrecido.

Por otra parte, las armadas de las potencias nucleares utilizan reactores nucleares como para producir la energía de propulsión de sus buques. Un gran número de buques nucleares militares, submarinos nucleares en particular, han estado funcionando desde los años 50. Estos navíos nucleares posiblemente han descargado grandes cantidades de materiales radiactivos al mar, pero los registros públicos de estos vertidos no son aparentes. En ocasiones los reactores nucleares in toto han sido simplemente arrojados al mar, a veces el combustible del reactor solo y en ocasiones el propio buque ha sido hundido con la totalidad de su inventario. Algunos submarinos nucleares militares y su inventario radiactivo también simplemente se han perdido en los mares, ya sea por accidente o debido a fallas.

Los materiales radioactivos también se utilizan para fines militares en el espacio. Muchos satélites militares en órbita alrededor de la Tierra llevan equipo militar propulsado por reactores nucleares o fuentes radiactivas. Tras su re-entrada, hay una alta

probabilidad de que el inventario radiactivo en estos satélites de propulsión nuclear termine en el mar. Hasta ahora se sabe que al menos dos satélites conteniendo reactores nucleares han desaparecido en el mar, uno en el océano Índico y otro en el Pacífico cerca de la costa norte de Chile.

IV.2. RADIOACTIVIDAD NATURAL ANTROPOGÉNICA

El aumento de las entradas en los océanos de radiactividad natural derivada de actividades humanas han recibido relativamente poca atención a pesar de que los radionucleidos naturales pueden ser movilizados en cantidades considerables por causa del procesamiento a granel de minerales. Los elementos radioactivos están presentes en los productos acabados y en los

desechos vertidos al mar. La minería de fosfato descarga isótopos derivados de la serie de desintegración del uranio natural, incluyendo el torio -230, bismuto-214, plomo-210 y el polonio-210. Los isótopos presentes en el producto fertilizante se introducen en el medio ambiente en forma de complejos de fosfatos solubles que pueden acabar en los mares.

Los materiales radiactivos de ocurrencia natural (NORM) y los materiales radiactivos de ocurrencia natural tecnológicamente mejorados (TENORM) consisten generalmente de residuos industriales o subproductos enriquecidos con elementos radiactivos que se encuentran en el medio ambiente, tales como el uranio, el torio y el potasio y cualquiera de sus productos de desintegración, como el radio y el radón. Estos elementos radiactivos naturales, que están presentes en muy bajas concentraciones en la corteza de la tierra, son llevados a la superficie a través de industrias antropogénicas, aunque también por medio de procesos naturales, como la fuga de gas radón a la atmósfera o a través de disolución en el agua subterránea.

NORM y TENORM son un producto de desecho de varias industrias no nucleares, incluyendo la minería y el procesamiento de mineral, la producción de petróleo y gas, la quema de carbón, petróleo o gas natural en las centrales térmicas, la producción de fertilizantes de fosfato, y industrias misceláneas (por ejemplo, del hormigón y la producción de cerámica). Los vertidos procedentes de la mayoría de los sectores no nucleares (excepto la industria del petróleo y el gas) se vuelcan a la red de alcantarillado, a los ríos o directamente al mar. Los radionucleidos de larga vida de esta fuente son el radio- 226 y el radio -228, plomo 210 y el polonio - 210.

De particular importancia son las NORM y TENORM que se generan en el proceso de producción petróleo y gas cuando los fluidos producidos en las tareas de exploración llevan sulfatos a la superficie de la corteza terrestre. Las moléculas de los sulfatos de bario, calcio y estroncio son relativamente grandes, y átomos individuales más pequeños, tales como los de radio 226 y radio-228 pueden encajar en los espacios vacíos del compuesto y ser transportados a través de los fluidos producidos. A medida que los fluidos se acercan a la superficie, los cambios en la temperatura y presión hacen que los sulfatos precipiten fuera de la solución y formen escalas en el interior, o en ocasiones, el exterior de las tuberías y/o carcasa utilizadas en la explotación. También pueden ocurrir concentraciones mejoradas de radio 226 y 228 y sus productos de filiación, tal como el plomo -210, en los lodos

que se acumulan en las cercanías de los campos petrolíferos, tanques y lagunas.

El gas radón se concentra en las corrientes de gas natural y en las actividades de procesamiento de gas. El radón se descompone en plomo-210, bismuto-210, polonio-210 y se estabiliza en el plomo-206. Elementos de desintegración del radón se producen como una película brillante sobre la superficie interna de las líneas de entrada a las unidades de tratamiento, y en bombas y válvulas asociadas con los sistemas de procesamiento de propileno, etano y propano.

No existe información fidedigna completa sobre los vertidos de radioactividad al mar procedentes de la industria del petróleo y gas. Las estimaciones de los vertidos en el Mar del Norte procedentes del Reino Unido pueden dar alguna indicación del orden de magnitud: 1,082 GBq de ²²⁶Ra, 298 GBq de ²²⁸Ra y 39 GBq de ²¹⁰Po. En el cuadro siguiente se comparan los vertidos de radioactividad de emisores alfa de la industria del petróleo y el gas versus la nuclear.

Comparación de los vertidos de la Industria del Petróleo y el Gas vs. la Nuclear en el Atlántico Norte

Año	□ (10¹²Bq)	
	Petroleo/Gas	Nuclear
2005	6.4	0.52
2006	6.9	0.34
2007	7.4	0.19

IV.3. RADIATIVIDAD DEBIDA A ACTIVIDADES MILITARES

IV.3.1. Introducción

Las operaciones militares han sido causa de importantes vertidos radiactivos al mar, de precipitaciones radioactivas desde la atmósfera, así

como de desechos y residuos radiactivos sólidos que fueron arrojados al mar incluidas pérdidas en el fondo oceánico de instalaciones in toto.

Tras el bombardeo nuclear de Hiroshima y Nagasaki en Japón, el grupo de países denominado formalmente “Estados poseedores de armas nucleares” implementó una secuencia intensiva de producción y ensayo de armas nucleares. Los culpables de esta afrenta contaminante de los mares fueron en primer lugar, los Estados Unidos de América, la ex Unión Soviética (y después por la Federación de Rusia), el Reino Unido, Francia y China, a los que se adicionaron más recientemente los poseedores de armas nucleares de facto, la India, Pakistán, Israel y Corea del Norte.

Las pruebas y los ensayos de armas nucleares son las principales operaciones militares en relación a la contaminación de los mares con radioactividad. Estas se llevaron a cabo principalmente en el hemisferio norte entre 1945 y la década de 1980. Al comienzo las pruebas fueron atmosféricas, es decir realizadas a cielo abierto. La mayoría se llevaron a cabo a nivel del suelo, muchas veces tuvieron lugar directamente sobre las aguas del océano, en particular sobre las lagunas de atolones en el Océano Pacífico. La enorme radioactividad producida en los estos ensayos ingreso sin ningún control a la atmósfera y, a veces, directamente a la hidrosfera. Una gran parte de las emisiones atmosféricas se depositaria eventualmente en los mares.

El tratado de prohibición de pruebas dejó en suspensión las pruebas atmosféricas pero los experimentos subterráneos continuaron, dejando grandes cantidades de materiales radioactivos en las estructuras geológicas. La mayor parte de este inventario geológico se ha mantenido básicamente inmovilizado en los sitios de prueba, pero una fracción probablemente infiltrará hacia los mares, sobre todo de aquellas pruebas que se realizaron en estructuras permeables rodeadas por el océano tales como atolones.

Las descargas en los mares de materiales radiactivos de carácter militar no se limitaron a las asociados con las pruebas de nucleares per se. Se establecieron grandes complejos industriales para la producción de materiales de armas. Estos complejos tienen reactores nucleares, que se utilizan como instalaciones de producción, y plantas químicas sofisticadas que procesar el combustible nuclear para obtener material bélico y generan deferentes cantidades de residuos. Las instalaciones de producción y plantas de reprocesamiento descargan grandes cantidades de materiales

radiactivos en el medio ambiente. Una fracción de estos materiales eventualmente llega a los mares. A veces, los residuos y desechos de estas instalaciones fueron directamente arrojados a los mares. Las descargas de material radioactivo al medio ambiente de las instalaciones nucleares militares no están reguladas. Es de señalar que la producción y pruebas de armas nucleares es una industria secreta y típicamente auto-controlada. No están bajo la jurisdicción de ningún convenio internacional jurídicamente vinculante ni regulados por una autoridad independiente. La información oficial disponible sobre esta práctica es más que escasa.

Es así que el legado radiológico en los océanos que es atribuible a los ensayos nucleares presenta una imagen multifacética. Este se debe principalmente a la lluvia radiactiva en los mares de los materiales radiactivos que se encontraban dispersos en la atmósfera como consecuencia de las explosiones nucleares. Pero también incluye los materiales residuales radiactivos de las pruebas, así como de las consecuencias locales y descargas de las instalaciones de producción que llegan a los océanos a través de los ríos o mares costeros. Además, el legado incluye la posible transferencia a largo plazo de los océanos debido a la migración de los residuos radiactivos en las estructuras geológicas y la ventilación asociados con las pruebas subterráneas que ya se realizaron.

IV.3.2. La producción de armas nucleares

La producción de armas nucleares implica la obtención de uranio enriquecido o plutonio para dispositivos de fisión y de tritio y deuterio de los dispositivos de fusión. Las emisiones radiactivas del ciclo de combustible para fines militares es análoga a la de los programas pacíficos de generación de energía eléctrica nuclear, es decir, puede haber liberaciones de materiales radioactivos al ambiente en general y a los mares en particular proveniente de: la minería y tratamiento del uranio, el enriquecimiento de uranio, la fabricación de combustible, el funcionamiento de los reactores de producción y el reprocesamiento de combustible principalmente para la separación de plutonio. Una diferencia principal, sin embargo, es que los programas nucleares pacíficos están sujetos por lo general a la supervisión y el control de organismos reguladores independientes, mientras que los programas militares por lo general no tienen ningún control independiente. Cantidades no comprobadas de radionucleidos han sido liberados en el medio ambiente en las diversas etapas del ciclo de producción de materiales para armas nucleares, pero en particular durante el reprocesamiento de combustible y separación de plutonio.

Durante el tiempo en que los arsenales de armas nucleares se estaban construyendo, sobre todo en los primeros años (1945-1960), hubo grandes emisiones de radionucleidos de las instalaciones de producción pertinentes. Dado que había poco conocimiento del potencial de transporte del medio ambiente el control de las emisiones fue pobre; la evaluación ahora debe basarse principalmente en la reconstrucción.

IV.3.2.1. La Producción en EEUU

En los EE.UU., las plantas de producción de materiales de armas nucleares que han contribuido a las emisiones ambientales incluyen Fernald en Ohio (tratamiento de materiales) , Oak Ridge en Tennessee (enriquecimiento , separaciones , laboratorios), Rocky Flats en Colorado (fabricación de piezas de armamento), Hanford en Washington (producción de plutonio) y el río Savannah en Carolina del Sur (producción de plutonio). En la Federación Rusa, las instalaciones incluyen Chelyabinsk, Krasnoyarsk y Tomsk. En el Reino Unido, Springfield (procesamiento de uranio y fabricación de combustible) , Capenhurst (enriquecimiento) , Sellafield (reactores de producción y reprocesamiento) , Aldermaston (fabricación de armas) y Harwell (investigación) . En Sellafield fueron operados reactores de producción de plutonio (dos reactores refrigerados por gas y moderados por grafito conocidos como las pilas Windscale). Un incendio ocurrió en uno de los reactores Windscale en 1957 y resultó en una gran liberación de radionucleidos que en su gran mayoría fueron eventualmente depositados en el mar. En Francia, el primer reactor experimental, denominado EL1 o Zoé, estuvo crítico en 1948 , y una planta de reprocesamiento piloto comenzó a funcionar en 1954. Un segundo reactor experimental, EL2 , fue construido en el centro de Saclay . De 1956 a 1959 , tres reactores de producción más grandes comenzaron a funcionar en el complejo de Marcoule en el río Ródano . Estos reactores moderados por grafito refrigerados por gas, operaron hasta 1968 , 1980 y 1984 respectivamente. Una planta de reprocesamiento en gran escala también fue construida y operada en el sitio de Marcoule desde 1958 . Otras dos plantas de reprocesamiento se construyeron en La Haya, en el norte de Francia . En China , el primer reactor experimental fue construido en Beijing, y una planta de enriquecimiento de uranio fue construido en Lanzhou, provincia de Gansu. El reactor de producción comenzó a funcionar en 1967, y la planta de reprocesamiento en 1968. La producción de plutonio y el reprocesamiento se llevo a cabo en el complejo Jinqian , también en la provincia de Gansu. Producción y reprocesamiento también tuvieron lugar en Guangyuan en la provincia Sichun , donde se construyeron instalaciones más grandes.

En algunos de los sitios de armas nucleares en el mundo, se han incorporado actividades relacionadas con programas de energía nuclear con fines pacíficos. En algunas de ellas se está produciendo el desmantelamiento de las armas como resultado de los programas de desarme y el material de base se está transfiriendo a la industria nuclear pacífica.

Durante los primeros años de funcionamiento de algunas de estas instalaciones militares se produjeron liberaciones de sustancias radiactivas en el medio ambiente relativamente altas. Fue cuando las presiones para cumplir con los programas de producción eran altos y los autocontroles relajados. Además, un número de accidentes aumentaron las descargas, sobre todo en las instalaciones de la antigua URSS.

En los EE.UU., los dos primeros reactores nucleares de producción comenzaron a funcionar en Hanford en 1944. Se utilizó agua del río Columbia para enfriar los reactores y productos de activación y algunos productos de fisión fueron lanzados al río y desde allí llegaron hasta el Océano Pacífico, a una distancia de unos 600 km de la planta. Información precisa sobre estas primeras descargas no está disponible. Las liberaciones anuales posteriores hasta el Océano Pacífico se han estimado en unos 10 PBq. La siguiente tabla presenta las liberaciones de radionucleidos de las plantas de producción de materiales y de fabricación de las armas nucleares en los Estados Unidos.

Fernald	Oak Ridge	Rocky Flats	Hanford	Savanna River
150 GBq uranio	1000000 GBq ¹³¹ I	260 GBq Pu	27300000 GBq ¹³¹ I 481000000 ²⁴ Na	160 GBq Pu

IV.3.2.2. La Producción en la e-USSR

En la antigua Unión Soviética una planta de producción importante fue el Complejo de Producción de Materiales Nucleares de Mayak, que se encuentra en la región de Chelyabinsk, entre las localidades de Kyshtym y Kasli, 150 km al noroeste de Chelyabinsk en Rusia y cerca de la orilla oriental del lago Irtyash. La planta se encuentra en la unidad administrativa territorial central de Ozersk, anteriormente conocida como Chelyabinsk- 40, más tarde como Chelyabinsk- 65 , y es parte de la región de Cheliábinsk. Al final de 1948, la planta de Mayak comenzó a producir plutonio como parte

del programa nuclear de la antigua Unión Soviética, con el funcionamiento de reactores de uranio-grafito para la producción de plutonio y una planta de reprocesamiento. Durante 1949-1956 ocurrieron grandes descargas de materiales radiactivos al cercano río Techa un afluente del río Ob, el que se forma al suroeste de Biysk en Altai Krai y zigzaguea al oeste y al norte hasta llegar a 55 ° N, donde se curva y vuelve al noroeste, y una vez más al norte , y fluye finalmente hacia el este desembocando en el Golfo de Ob, de la bahía del Mar de Kara. Los autocontroles de las emisiones de Mayak, inicialmente ausentes, se introdujeron en la década de 1960. Durante los próximos años fueron liberados 108 PBq de residuos radiactivos líquidos en el río Techa, incluyendo radioisótopos tales como el ^{90}Sr (12 PBq), el $^{95}\text{Zr/Nb}$ (14 PBq), el ^{103}Ru (28 PBq) y el ^{137}Cs (13 PBq).

Durante el funcionamiento de Mayak ocurrieron muchos accidentes con liberación de radioactividad, incluyendo los siguientes:

> En abril y mayo de 1951, una inundación fluvial dio lugar a la contaminación de la llanura circundante que se utiliza para el pastoreo de ganado y la producción de heno, contaminación que pasó luego al sistema fluvial.

> El 29 de septiembre de 1957, un fallo en el sistema de refrigeración de un tanque de almacenamiento que contenía residuos radiactivos líquidos dio lugar a una explosión química y una gran liberación de radionucleidos. La actividad total dispersa fuera de las instalaciones sobre el territorio de Chelyabinsk, y las regiones Sverdlovsk y Tyumen fue de aproximadamente 74 PBq.

> Además en 1967 se produjo una contaminación con residuos radiactivos asociados con la operación del complejo Mayak, cuando retrocedió el agua en el lago Karachai, el que había sido utilizado para la eliminación de residuos, y el viento hizo que sedimentos contaminados de la costa se resuspendieran.

Desde 1951, sin embargo, las liberaciones se redujeron significativamente como consecuencia de los vertidos de residuos radiactivos líquidos de nivel intermedio se desvían hacia el lago Karachai y la construcción de una serie de presas y embalses.

En suma, durante el período comprendido entre 1962 y 1992 un total de 108 TBq fueron liberados en el río Techa. Debido a la distancia entre la planta de Mayak y el Mar Ártico sólo una pequeña fracción de los radionucleidos más móviles de Mayak puede haber llegado al mar de Kara. La siguiente figura presenta la liberación de materiales radiactivos asociados con la operación

temprana del complejo de producción de materiales en Chelyabinsk- 40 en la región de los Urales oriental de la Federación Rusa

Los otros dos principales instalaciones para la producción de armas nucleares en la ex Unión Soviética son el Complejo de Producción de Materiales Nucleares de Krasnoyarsk (Krasnoyarsk- 26) y el Complejo de Producción Materiales Nucleares de Tomsk (Tomsk -7).

Las instalaciones de Krasnoyarsk- 26 estan ubicadas cerca de la ciudad homónima a la vera del río Yenisei que es el mayor sistema fluvial que fluye hacia el océano Ártico, con 5.539 kilometros es el quinto río más largo del mundo, y sigue un curso hacia el norte hasta el Golfo Yenisei en el Mar de Kara. El primer reactor de las instalaciones, de flujo directo, en entró en servicio en 1958, el segundo en 1961 y el tercer reactor de circuito cerrado en 1964. Una planta radioquímica para el reprocesamiento de combustible irradiado se puso en funcionamiento en 1964. Vertidos de residuos radiactivos del complejo Krasnoyarsk- 26 se han arrojado al río Yenisei desde entonces. En 1992, dos de los tres reactores del complejo de Krasnoyarsk- 26 fueron cerrados. Esto redujo considerablemente la cantidad de descargas radiactivas en el río Yenisei .

Tomsk - 7 se encuentra en la margen derecha del río Tom, otro afluente del río Ob, 15 kilómetros al norte de la ciudad de Tomsk. Fue puesto en operación en 1953 y es el mayor complejo para la producción de elementos de plutonio, uranio y transuránicos en la Federación Rusa. El complejo Tomsk incluye reactores de producción de grafito de uranio, instalaciones de fabricación de enriquecimiento y de combustible, y una planta de reprocesamiento. Los radionucleidos presentes en los residuos líquidos se vierten en el río Tom, y de allí al río Ob y al Mar de Kara. En 1990/92, tres de los reactores del complejo Tomsk fueron cerrados, lo que redujo considerablemente la cantidad de los vertidos radiactivos al río Tom. El 6 de abril de 1993, se produjo un accidente en una planta de radioquímica, dando lugar a la liberación de materiales radiactivos..

La entrada total de ^{90}Sr a los mares del Ártico por los ríos en el período 1961-1994 fueron 2,4 PBq , con 1,4 PBq al mar de Kara.

IV.3.2.3. La Producción en UK y Francia

En el Reino Unido , el programa de producción de armas nucleares se inició a finales de 1940 con la creación del Instituto de Investigación de Energía Atómica de Harwell y la construcción de las instalaciones nucleares en Windscale (conocido más tarde como Sellafield) y Springfields . Mientras que los efluentes radiactivos líquidos de Harwell y Springfields se liberan en

los sistemas fluviales (el río Támesis y el estuario de Ribble), Windscale fue la primera instalación nuclear de envergadura diseñada para la evacuación de efluentes radiactivos líquidos directamente en el mar. Las descargas de material radiactivo en el mar de Irlanda se iniciaron en 1952, cuando la instalación nuclear entró en funcionamiento. En ese año, alrededor de 700 TBq de efluentes radiactivos líquidos fueron arrojados al Mar de Irlanda. A lo largo de las décadas de 1950, 1960 y 1970 los vertidos de Sellafield aumentaron constantemente hasta alcanzar un máximo en 1975, cuando fueron arrojados al mar 1 PBq. A comienzos de 1990, las descargas fueron de aproximadamente dos órdenes de magnitud o más bajas.

Desde 1992, con la puesta en marcha de una planta de extracción de actínidos mejorada las descargas disminuyeron muchísimo. Los vertidos anuales actuales de líquido radiactivo son del orden de 100 TBq.

Además de las liberaciones derivadas de Sellafield, las contribuciones más significativas a la entrada de radioactividad a los mares del norte de Europa son los vertidos radiactivos de las plantas de reprocesamiento de combustible nuclear en Cap de la Hague, en Francia y, en menor medida, de Dounreay, en el Reino Unido . La planta de reprocesamiento de combustible nuclear en el Cap de la Hague comenzó a operar en 1965. Un total de alrededor de 19 PBq de residuos radiactivos líquidos excuidos los de tritio han sido liberados de Cap de la Hague en el Canal de la Mancha. Las descargas de tritio han aumentado de manera constante desde el inicio de las operaciones en el sitio ; las liberaciones anuales actuales son del orden de 15 PBq, es decir 3-4 veces superior a los vertidos procedentes de Sellafield .

Las primeras descargas registradas de Dounreay en el Mar del Norte son de 1958 . Excluyendo el tritio se arrojaron al mar un total de unos 11 PBq . Las descargas de tritio han sido bajas (0,2 PBq en total) . Los vertidos alcanzaron su punto máximo en 1967, cuando 1,2 PBq de emisores alfa y beta-gamma fueron arrojados al mar. Los vertidos anuales actuales son de menos de 1 TBq .

La cantidad de las descargas la mar de emisiones, desechos y residuos radioactivos procedentes de la producción de armas nucleares material no es totalmente conocida. UNSCEAR sigue recopilando y publicando la información proporcionada por los Estados que producen armas nucleares, información que es escasa.

IV.3.3. 'Experimentos' con Armas Nucleares

Los Estados poseedores de armas nucleares llevaron a cabo los eufemísticamente denominados "experimentos" nucleares en muchos sitios, algunos de ellos ubicados en ambientes oceánicos. Estos experimentos fueron de dos tipos: pruebas de bombas nucleares y ensayos de seguridad de bombas nucleares, y ambos contribuyeron con una gran cantidad de radioactividad arrojada a los mares.

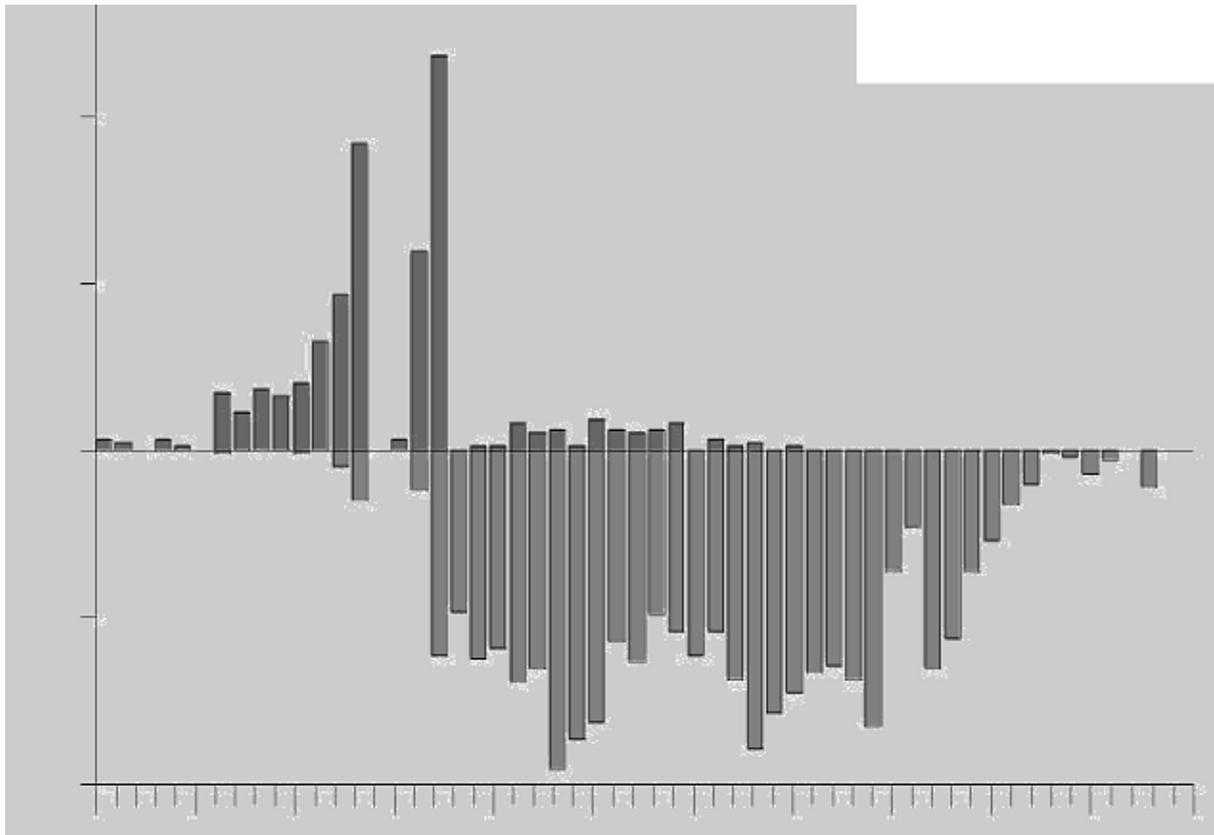
En las pruebas nucleares, se explotan dispositivos nucleares con grandes emisiones de energía. Hay dispositivos que explotan por fisión nuclear, o por fusión nuclear, o una combinación de ambos. En los dispositivos de fisión, dos masas subcríticas de material fisible, como el uranio-235 y plutonio-239, se combinan para producir una masa supercrítica, el núcleo pesado se fisiona en dos partes (los productos de fisión), y se emiten neutrones, la liberación de energía es la equivalente a la diferencia entre la masa en reposo del núcleo original y la masa en reposo de los productos de fisión y los neutrones. En el dispositivo de fusión, núcleos atómicos de bajo número atómico se fusionan para formar un núcleo más pesado con la liberación de grandes cantidades de energía, la reacción se convierte en auto-sostenible a muy altas temperaturas, que se consiguen con la ayuda de un dispositivo de fisión interior rodeado por material hidrogenado ligero, como el deuterio y el deuterio de litio.

Por el contrario, en las pruebas de seguridad, las bombas nucleares quedan sujetas a condiciones de accidente simulado. Durante ellos, el núcleo de los dispositivos nucleares es destruido por explosivos convencionales (para asegurarse que no exploten accidentalmente) con ninguna o, en algunos casos, muy pequeñas liberaciones de energía nuclear, pero con una gran contaminación producida por la dispersión del material fisible de la bomba, por ejemplo el extremadamente radio-tóxico plutonio-239. Mientras que los residuos radiactivos de una prueba nuclear son los productos de fisión y fusión, el residuo radiactivo de un ensayo de seguridad es el material fisiónable en sí.

Ambos 'experimentos', las pruebas nucleares y los ensayos de seguridad, se llevaron a cabo en la atmósfera y bajo tierra, y contribuyeron con diferente intensidad a la entrada de sustanciales cantidades de radioactividad a los mares.

La tabla siguiente describe los 2408 experimentos nucleares que se han informado al UNSCEAR. De ellos, 541 fueron atmosféricos y 1867 fueron bajo tierra. El rendimiento total de todas las pruebas fue de 530 megatones. (El rendimiento se expresa generalmente en kilotonnes o megatones, un kilotón equivale a 1.000 toneladas de trinitrotolueno (TNT) y un megatón es

equivalente a un millón de toneladas de TNT. Con el fin de evitar la ambigüedad, se ha acordado que un kilotón es exactamente equivalente a la liberación de 1,012 calorías de energía explosiva.) . De este total, 440 megatones fueron de pruebas atmosféricas y 90 megatones de ensayos subterráneos, de ellos veinte y cinco pruebas atmosféricas representan casi el 66 % de la potencia explosiva total de todas las pruebas.



150

Número de “Experimentos”

Number of tests

100

50

NUMBER

0

50

1945 1950 1955 1960 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000

IV.3.3.1. Liberación al Medio Ambiente y Descarga al Mar de la Radioactividad de las Explosiones Nucleares

Las pruebas nucleares atmosféricas e hidrosféricas resultaron en la liberación incontrolada en el medio ambiente de grandes cantidades de materiales radiactivos, que fueron muy dispersos por la atmósfera y se depositaron en todas partes, incluso en todos los mares del mundo. La estimación del depósito es relativamente precisa basada en numerosas mediciones de la deposición global, en particular la los radionúclidos ^{90}Sr y ^{137}Cs y de la ocurrencia de esos y otros radionucleidos en la dieta y el cuerpo humano. La información disponible sobre el número y el rendimiento de los ensayos nucleares es enorme y el total estimado de los rendimientos de fisión de las pruebas individuales está de acuerdo con la deposición global medida de los radionúclidos ^{90}Sr y ^{137}Cs , según lo determinado por las redes de monitoreo en todo el mundo, lo que hace sólida la estimación de la actividad que entró en los mares.

UNSCEAR ha analizado el impacto ambiental de las pruebas con gran detalle. Con estimaciones de la producción de cada radionucleido en las pruebas individuales y el uso de un modelo empírico de transporte atmosférico, fue posible para el UNSCEAR para determinar el curso temporal de la dispersión y deposición de radionucleidos y por lo tanto la estimación de su entrada en los mares. La deposición media es de alrededor de 10 % más alto en el hemisferio norte, donde la mayoría de las pruebas se llevó a cabo, y más baja en el hemisferio sur.

Las pruebas nucleares en la atmósfera comenzaron a principios de 1950, y se prolongó hasta 1962, cuando se firmó el tratado de prohibición de pruebas nucleares en la atmósfera. Las pruebas fueron ensayos con armas nucleares de fisión y fusión y ensayos de seguridad de armas nucleares, y que se llevaron a cabo en el ambiente abierto y subterráneo. El número de experimentos fue mayor durante 1951-1958 y 1961-1962. Hubo una moratoria en 1959, que se observó en gran medida en 1960, también. Los años más activos desde el punto de vista del total de los rendimientos explosivos fueron 1962 , 1961 , 1958 y 1954. El tratado de prohibición de pruebas nucleares fue motivado por la alarmante propagación de los contaminantes radiactivos en el medio ambiente e incluso en el suministro de alimentos humanos. Por ejemplo, el ^{90}Sr era fácilmente detectable en la leche.

Después de la prohibición de las pruebas, los niveles de precipitación radioactiva disminuyeron abruptamente.

Los ensayos subterráneos causaron liberaciones inmediatas en el medio ambiente más allá de los sitios de prueba sólo si los gases radiactivos se filtraron o fueron ventilados. La mayoría de los ensayos subterráneos tenían rendimientos muy inferiores a los ensayos atmosféricos. Sin embargo, pueden producirse liberaciones a largo plazo en los mares, en particular de aquellos sitios cercanos al ambiente oceánico. Los ensayos subterráneos se llevaron a cabo a un ritmo de 50 o más por año desde 1962 hasta 1990. Aunque es la intención de la mayoría de los países a un acuerdo para prohibir todas las pruebas adicionales, tanto atmosféricas y subterráneas, la Organización del Tratado de prohibición completa aún no ha entrado en vigor.

La pruebas atmosféricas arrojaron al aire la increíble cantidad de radioactividad de un zetta-bequerel (10²¹ Bq) con una composición isotópica variables tal como muestra la tabla siguiente.

Radioactividad vertida en las pruebas atmosféricas

RADIONUCLIDO	VIDA MEDIA	ACTIVIDAD
Tritio	12.32 años	240
Carbono-14	5730 años	0.22
Cesio-137	30.14 años	0.912
Estroncio-90	28.6 años	0.604
Iodo-131	8.02 días	651
Plutonio-239	24100 años	0.0065

La mayor parte de esta actividad precipitó sobre la superficie de la Tierra como lluvia radiactiva de una manera bastante homogénea. Dando que la superficie del océano es de aproximadamente 70 % de la superficie de la Tierra, en torno a 700 exa-bequerel (10¹⁸ Bq) de actividad antropogénica ha

sido arrojada a los mares por los experimentos nucleares en la atmósfera por sí solos (Los residuos radiactivos de los 90 megatones explotados debajo de la Tierra están básicamente contenidos en los medios geológicos, pero pueden pasar a lo largo de los siglos a través de los suelos y, finalmente, llegar al medio ambiente y al mar, sobre todo aquellos efectuados en atolones como se verá mas adelante).

Dependiendo de la ubicación de las explosiones atmosféricas (altitud y latitud) la radioactividad producida por las explosiones entró en el medio ambiente local, regional, o global. Para las pruebas atmosféricas llevadas a cabo sobre la superficie de los mares y de atolones, una parte de la radioactividad entro directamente al mar y no como lluvia radiactiva.

Pero la mayoría de la radioactividad las explosiones en el aire fue ampliamente dispersa en la atmósfera. A partir de allí, después de transitar varios compartimentos atmosféricos, se deposita en forma de lluvia generalizada sobre la superficie de la Tierra. La superficie de los océanos recibió la mayor fracción de la lluvia.

Los residuos radiactivos de una prueba nuclear atmosférica se dividen entre el deposito local y el que sigue a las regiones de la troposfera y la estratosfera de la atmósfera. La deposición depende del tipo de prueba, la ubicación y el rendimiento. La porción de los residuos radiactivos depositados localmente en el sitio se denomina precipitación local. El resto está muy disperso en la atmósfera. La precipitación local de pruebas de superficie puede comprender tanto como el 50 % de la producción de residuos radiactivos e incluye grandes partículas de aerosoles radiactivos. Estas partículas se depositan dentro de unos 100 kilómetros del lugar de la prueba. Por lo general, cuando la altitud de la detonación es suficientemente alta, la bola de fuego creada por la explosión no alcanza el nivel del mar aunque se haga sobre el mar. En estos casos se reduce al mínimo la producción de precipitación local. La lluvia radiactiva troposférica consta de aerosoles más pequeños que se mueven a través de la tropopausa después de la explosión y que se depositan con un tiempo medio de residencia de hasta un mes. Durante este tiempo, la radioactividad se dispersa en la banda de latitud de inyección siguiendo trayectorias que se rigen por los patrones de viento. Esta lluvia troposférica es importante para los radionucleidos con una vida media de unos pocos días a dos meses, y por lo tanto, no es significativo para el inventario radiactivo a largo plazo de los mares. Pero distinto es con las consecuencias de la estratosfera, que comprende una gran parte de la lluvia radiactiva total resultante de las partículas que se llevan a la estratosfera, que con el tiempo dan lugar a una precipitación mundial, la mayor parte de

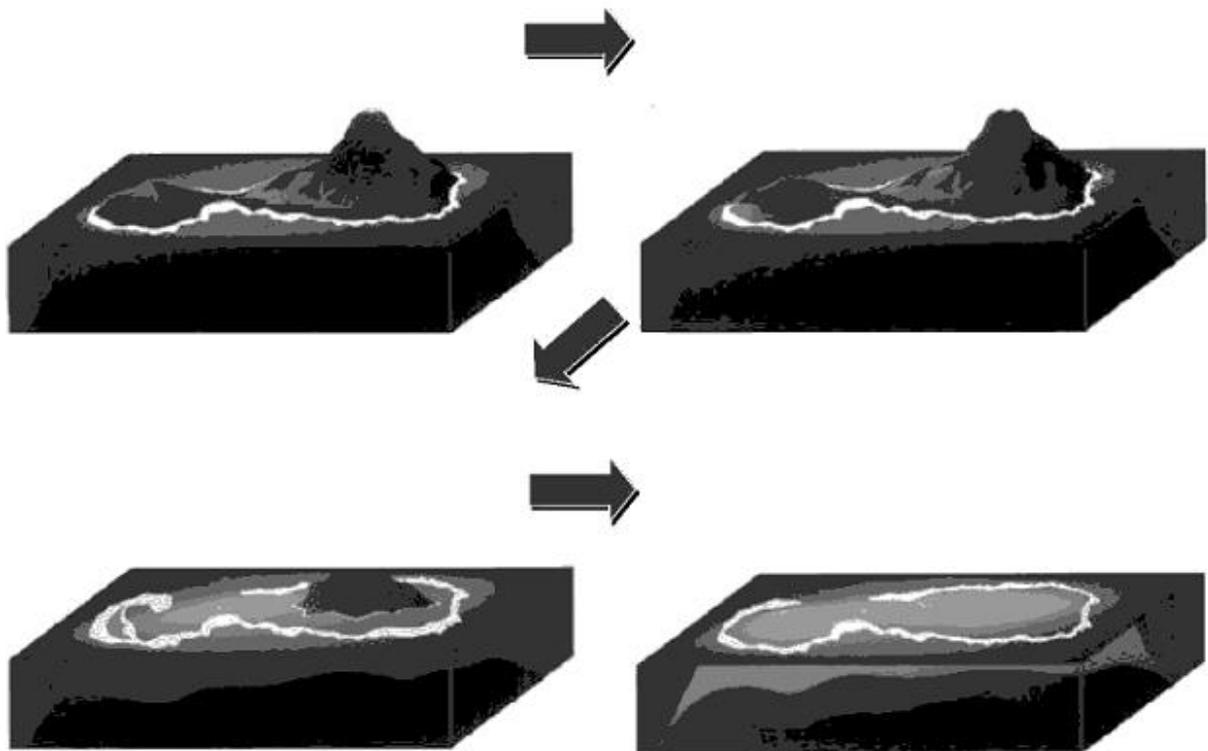
los cual cae en el hemisferio de la inyección. La lluvia estratosférica explica la mayor parte de la inyección antropogénica en todo el mundo de productos de fisión de larga vida en los mares.

Uno de los radioisótopos mas abundantes que dejaron los ensayos de armas nucleares fue el tritio. Su distribución en el mar es como una mancha de tinta reveladora del historial de la contaminación marina antropogénica. El tritio entró en la superficie del océano y se involucró en la circulación termohalina en las aguas profundas del océano. (La circulación termohalina se refiere a la parte de la circulación oceánica a gran escala que se cree que está impulsada por gradientes de densidad globales creadas por el calor de la superficie y los flujos de agua dulce. El adjetivo Termohalina se deriva de termo, refiriéndose a la temperatura y halina refiriéndose al contenido de sal, factores que en conjunto determinar la densidad del agua de mar.) . A medida que el agua profunda se mueve, también lo hizo el tritio. Su concentración en varias profundidades y ubicaciones da una imagen de la historia de esta contaminación.

IV.3.3.2. Las Pruebas Oceánicas

Muchas pruebas de armas nucleares se llevaron a cabo en varios ambientes oceánicos donde dejaron residuos radiactivos significativos. De particular importancia para los fines de esta memoria son los experimentos oceánicos que se llevaron a cabo en atolones.

Los atolones son arrecifes de coral en forma de anillo que encierran una laguna, los arrecifes son un estrecho borde que sobresale unos metros por encima del océano. Canales irregulares, llamados hoas cortan atolón creando una cadena de islotes llamados motus (En las muchas lenguas polinesias habladas en la región del Pacífico, el término motu se refiere a los islotes particulares que forman un atolón, y el término hoa refiere al curso de agua que conecta el mar con la laguna entre mutus.) Los atolones evolucionaron a partir de volcanes submarinos que hace millones de años hicieron erupción bajo el mar, creando islas que remitieron lentamente con el tiempo. Depósitos de coral muerto, fueron apareciendo alrededor de la isla que cedía por peso bajo el mar, tal como muestra la figura siguiente.



Hace 10 millones de años
emergieron islas volcánicas
en el Pacífico

Después de un millón de años
la actividad volcánica cesó y
apareció vegetación

Millones de años después las
islas se sumergieron por
peso propio y apareció coral
en sus flancos

Actualmente esas islas se han transformado en atolones, una franja angosta de coral que rodea una laguna central.

La mayoría de los experimentos nucleares se llevaron a cabo en y por encima de la superficie del atolón y su laguna, incluyendo en torres en

motus, en barcas, en suspensiones de globos, etc. En este entorno puramente oceánico la mayoría de las sustancias radiactivas liberadas durante los experimentos nucleares terminó en los mares.

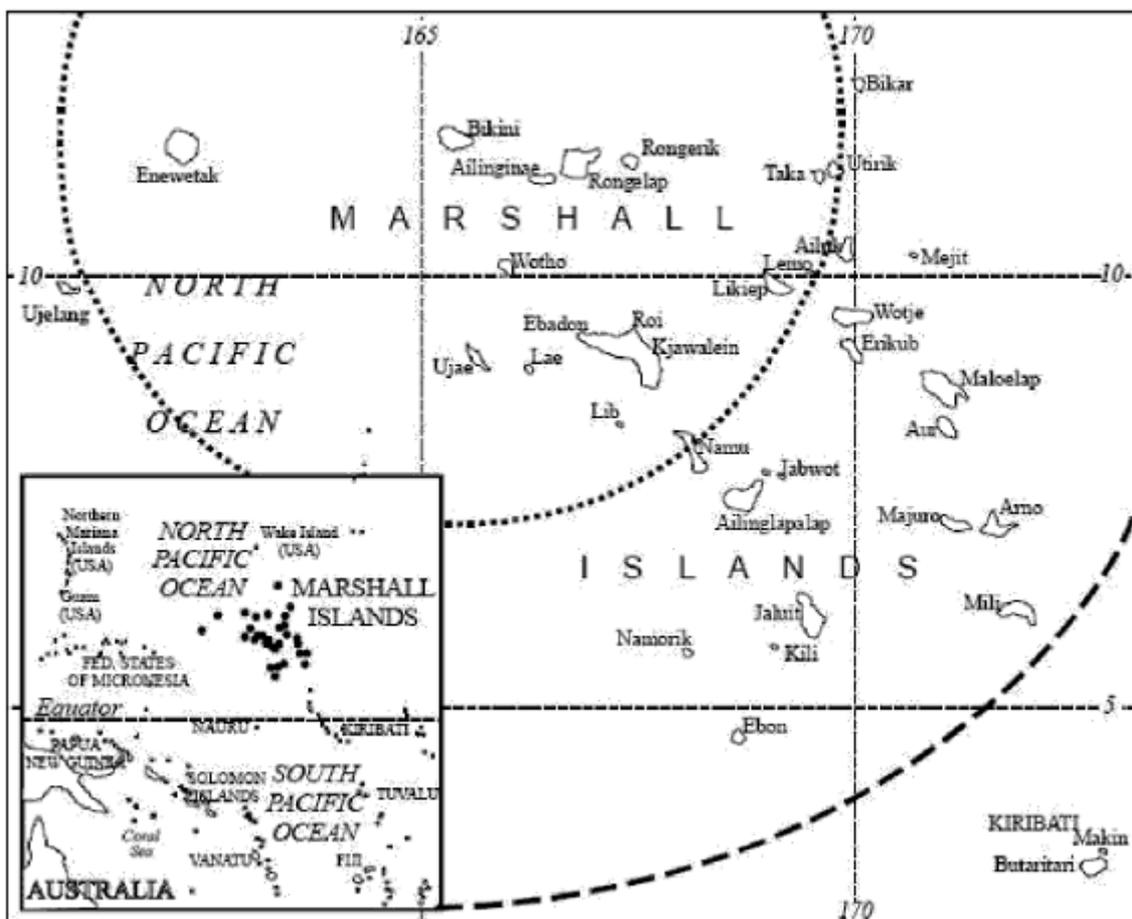
En los últimos años, varios Estados han pedido al OIEA evaluar, vis-à-vis sus normas internacionales de seguridad radiológica, las situaciones derivadas de los experimentos nucleares. Las evaluaciones más relevantes para el propósito de esta memoria fueron las solicitadas por la República de las Islas Marshall, para el atolón de Bikini en el archipiélago de las Islas Marshall, y por Francia para los atolones de Mururoa y Fangataufa en el archipiélago Tumuato en la Polinesia Francesa. (El OIEA también estudió los sitios de Reggane y In- Ekker en Argelia, el sitio de Semipalatinsk en Kazajstán, las condiciones radiológicas en las áreas de Kuwait con residuos de uranio empobrecido que dejó la guerra del Golfo, y de las condiciones radiológicas del mar de Kara occidental, donde grandes cantidades de residuos radiactivos, principalmente de las actividades militares en la ex Unión Soviética fueron arrojados al mar).

Debe tenerse en cuenta que otros sitios en ambientes oceánicos se han utilizado para pruebas nucleares, pero que no han sido evaluados a nivel internacional. Estos incluyen, otros atolones de las Islas Marshall, sitios en Australia que se encontraban en ambientes oceánicos (por ejemplo, las Islas Monte Bello); sitios oceánicos en la Federación de Rusia (por ejemplo, Novaya Zemlya) y en los EE.UU. (por ejemplo, Amchitka, Alaska), y varios lugares en el Océanos Pacífico y Atlántico, incluyendo las islas Malden, Navidad y Johnston. Los residuos radiactivos procedentes de estos sitios de ensayo han sido arrojados, directa o indirectamente, en los mares. Doce pruebas de superficie se llevaron a cabo durante 1952 a 1957 en tres sitios en las Islas Monte Bello, en Emu y en Maralinga de Australia. En los sitios de Maralinga se realizaron una serie de ensayos de seguridad que resultaron en la dispersión de plutonio en grandes áreas terrestres. En relación de las liberaciones directas a los mares, las pruebas en el Pacífico en Malden y las islas de Navidad en 1957 y 1958, así como las pruebas bajo el agua que tuvieron lugar en Novaya Zemlya, son particularmente relevantes. En estos sitios hubo explosiones en el aire sobre el océano y de dispositivos suspendidos por globos.

No es factible para esta memoria cubrir todos estos sitios de ensayos nucleares. Es por eso que se centrará con detalle, en los dos sitios oceánicos evaluados internacionalmente de gran importancia para la radioactividad de los mares: el atolón de Bikini en las Islas Marshall y los atolones de Mururoa y Fangataufa en el Archipiélago Tumuato.

IV.3.3.2.1. Las pruebas en el Atolón de Bikini, Islas Marshall

Los Estados Unidos llevaron a cabo un extenso programa de pruebas nucleares en lugares de las Islas Marshall de las que el OIEA estudió las realizadas en el atolón de Bikini. Las Islas Marshall (ver mapa) se compone de dos cadenas de islas archipelágicas de 29 atolones (Ailinginae, Ailinglaplap, Ailuk, Arno, Aur, Bikar, Bikini, Ébano, Enewetak, Erikub, Jaluit, Knox, Kwajalein, Lae, Likiep, Majuro, Maloelap, Mili, Namorik, Namu, Rongelap, Rongerik, Taka, Taongi, Ujae, Ujelang, Utirik, Wotho y Wotje. y cinco islas separadas de arrecife (Jabat, Jemo, Kill, Lib y Mejit), que comprenden en total 1.152 islas, islotes y motus. La superficie terrestre asciende a sólo 181 km² , pero la superficie total del mar es vasta, ya que se extiende más de 3000 kilómetros entre sus extremos noroeste y el suroeste. El archipiélago está situado a unos 4.000 kilómetros al suroeste de Honolulu, a mitad de camino entre Hawai y Papua Nueva Guinea, en las aguas tropicales del Océano Pacífico norte, al norte del ecuador y al oeste de la línea de fecha internacional, entre las latitudes 4° y 15° N y las longitudes 161° y 173° W. Kwajalein es el atolón más grande del archipiélago y, de hecho, el atolón más grande del mundo.



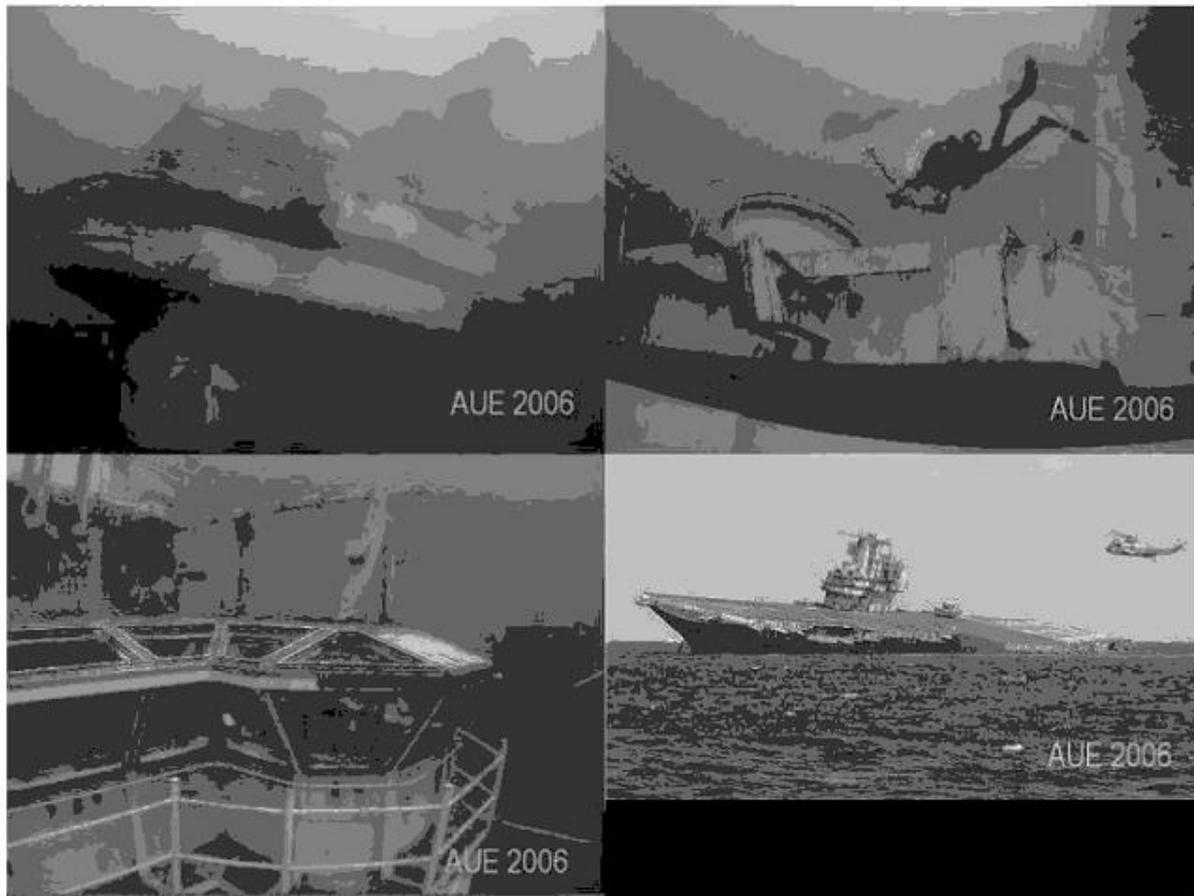
El atolón de Bikini se encuentra en la franja norte de las Islas Marshall y alejada de los otros atolones. Las islas de Bikini (ver figura), Eneu, Nam y Enidrik representan más del 70 % de la superficie terrestre del atolón. La mayor parte de las otras islas del atolón son más bien pequeñas o estrechas, y también tienden a ser infértiles, propensa a las tormentas y barrido por el agua de mar en los fuertes vientos y las mareas altas.



Los atolones Bikini y Enewetak fueron utilizados como lugares de pruebas en materia de armas nucleares por parte de EE.UU. entre 1946 y 1958. Bikini fue el escenario de 23 de las 66 pruebas realizadas bajo el agua, en el suelo y sobre la tierra en las Islas Marshall. Los rendimientos de las pruebas en el atolón de Bikini ascendieron a alrededor del 72 % del rendimiento total de $1,1 \times 10^2$ megatones para los dos sitios de prueba.

Las pruebas en Bikini comenzaron con la Operación Crossroads en 1946. Este experimento organizado por la Marina de EE.UU. involucró 242 barcos, 156 aviones y más de 42 000 efectivos militares y civiles, y utilizó más de 5000 animales de experimentación.

Uno de los objetivos militar era demostrar que las bombas nucleares podían hundir una flota. Para ello se ubicaron en la laguna del atolón más de 150 navíos que fueron hundidos a bombazos y aun permanecen en el fondo de la laguna (ver foto)

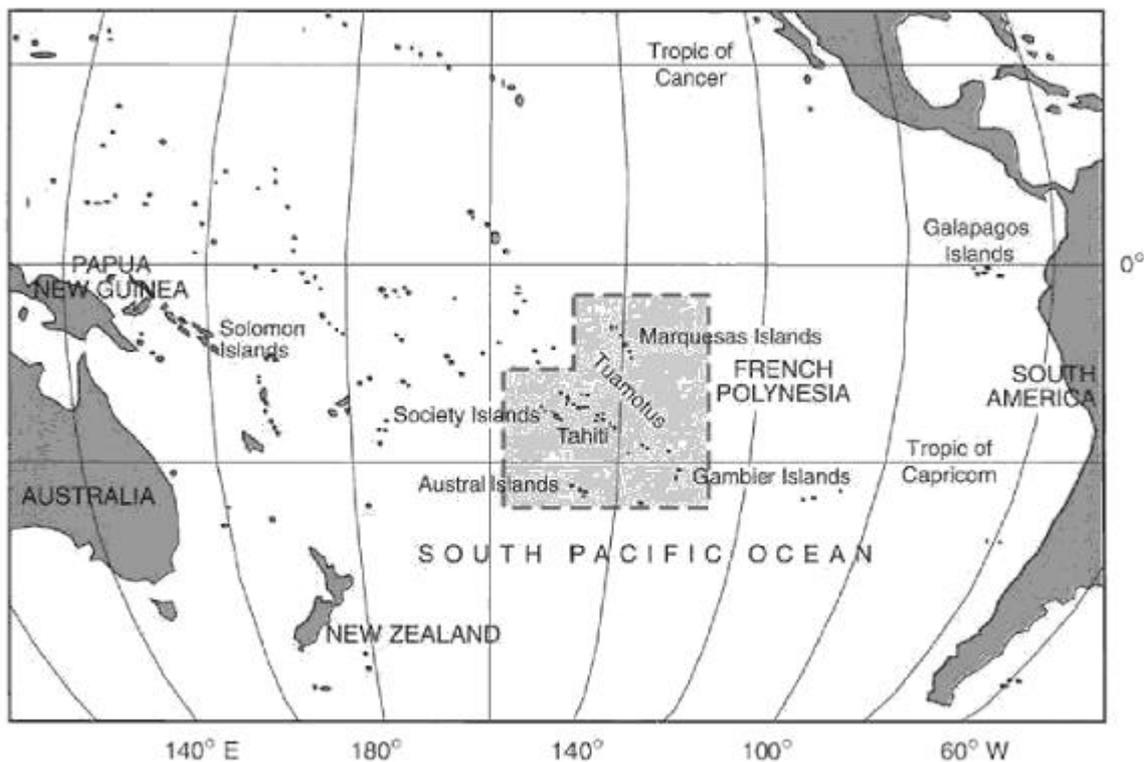


Desde julio de 1946, el atolón de Bikini permaneció inactivo como un lugar de pruebas y ensayos se realizaron en Enewetak en 1948 , 1951 y 1952. Luego, en febrero de 1954, el atolón de Bikini se reactivó como un lugar de pruebas con la serie ' Castle' y continuaron en 1956 con la serie ' Ala Roja ' y se terminaron en 1958 con la serie ' Hardtack I'. Las pruebas de alto rendimiento fueron los de la serie ' Castle', que incluyo el disparo 'Bravo' , un dispositivo termonuclear de 15 megatones.

La entrada de radioactividad a los mares causada por los experimentos de las Islas Marshall es enorme, casi inconmensurable, alrededor de 0.1 zeta-bequerels. A titulo de ejemplo, el fondo de la laguna del atolón de Bikini tiene uno de los mayores reservorios de plutonio del mundo.

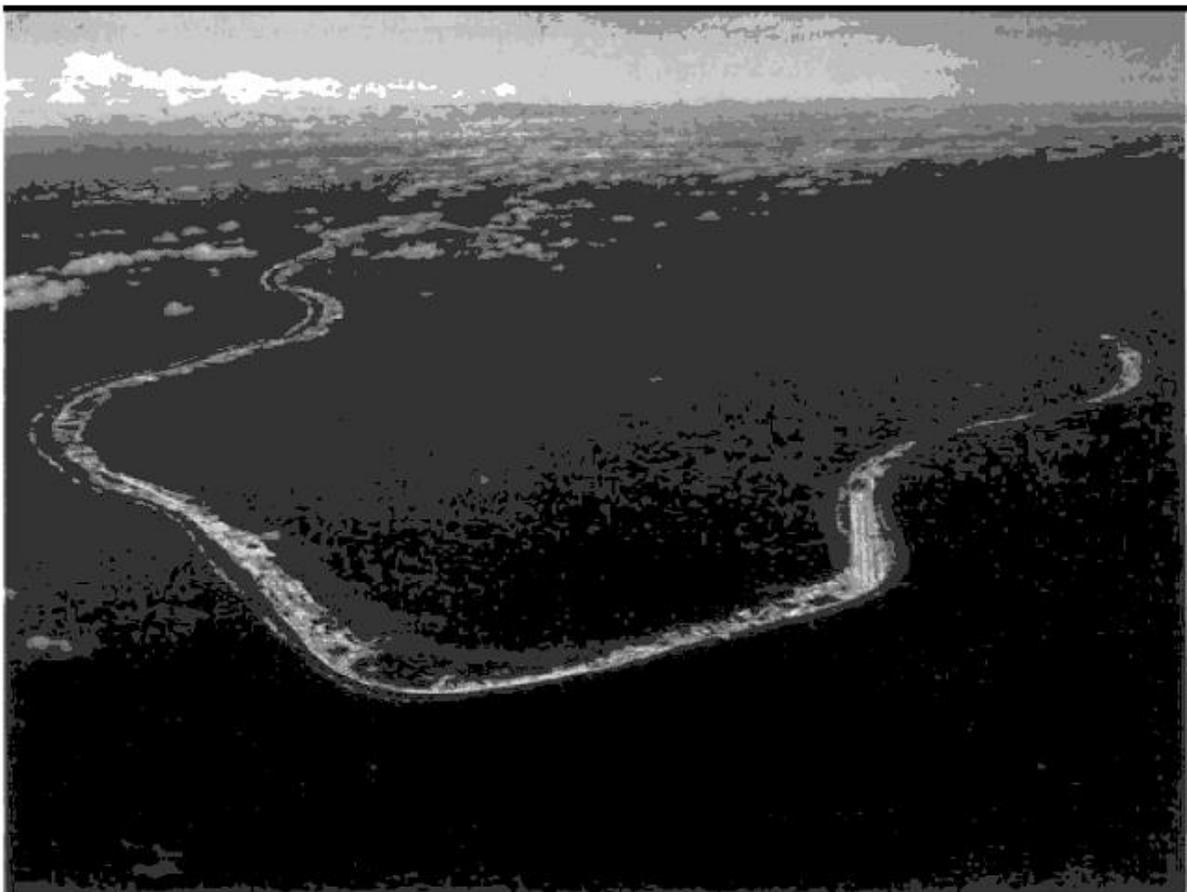
IV.3.3.2.2. Las Pruebas en los Atolones de Mururoa y Fangataufa

Francia realizó 193 experimentos nucleares por encima y por debajo de los atolones de Mururoa y Fangataufa en el archipiélago Tuamotu en el Pacífico Sur entre julio de 1966 y enero de 1996. Mururoa y Fangataufa son dos pequeños atolones situados en el territorio francés de ultramar de la Polinesia Francesa. Están a unos 1.200 km al este-sureste de Tahití y son administrativamente forma parte del archipiélago de Tuamotu. El Archipiélago Tuamotu comprende 76 islas, todos los cuales son atolones (ver mapa). Los de Mururoa y Fangataufa están situados en el extremo sur-oriental del archipiélago de Tuamotu. Mururoa, el mayor de los dos atolones, tiene coordenadas 21° 50' S, 138° 54' W, mientras Fangataufa, a 40 km al sur de Mururoa, 22° 14' S, 13 ° 45' O. Se encuentran a unos 150 km al norte del Trópico de Capricornio.



El atolón de Mururoa es un tanto elíptico (como se muestra en la figura abajo). Su eje principal, de 28 km de largo, se alinea aproximadamente de este a oeste. La laguna tiene unos 10 km de ancho y un perímetro de 63 km. El borde de coral emergido no es completo, tiene un pase de 4,5 kilómetros de ancho y hasta 9 m de profundidad en la costa norte - occidental. Hay más de 280 hoas que forman una cadena de motus. Sus bordes en su punto más alto es no más de 3 m por encima del nivel medio del agua baja. El área de la laguna de Mururoa es de 135 km². Su profundidad varía desde 50 hasta 55 m en el extremo oriental hasta alrededor de 20 m en el extremo occidental, con una profundidad media de unos 33 m. El volumen de la laguna es 4,7

109 m³. La velocidad a la que la laguna se vacía por agua del océano puede expresarse de diversas maneras pero, en promedio, todo el volumen de la laguna se intercambia con el océano cada tres meses. La mayor parte de este intercambio se lleva a cabo a través del paso principal, pero los hoas más pequeños en el borde sur hacen una contribución importante. Alrededor del 70 % de la planta de la laguna de Mururoa está cubierta por una capa de sedimentos no consolidados, de grano fino, de arena de grado derivada de coral y de esqueletos calcáreos de organismos marinos. Un rasgo característico de la laguna es el gran número de pináculos y "cabezas" de coral. Estos son los pilares de corales, de hasta 100 metros de diámetro en su cumbre, que en algunos casos se elevan a la superficie, donde pueden constituir un peligro para la navegación. Es posible que hayan desarrollado en las regiones de la laguna que tienen una afluencia especialmente elevada de agua tibia, rica en nutrientes. La figura siguiente muestra una visión aérea de Mururoa.



Mururoa

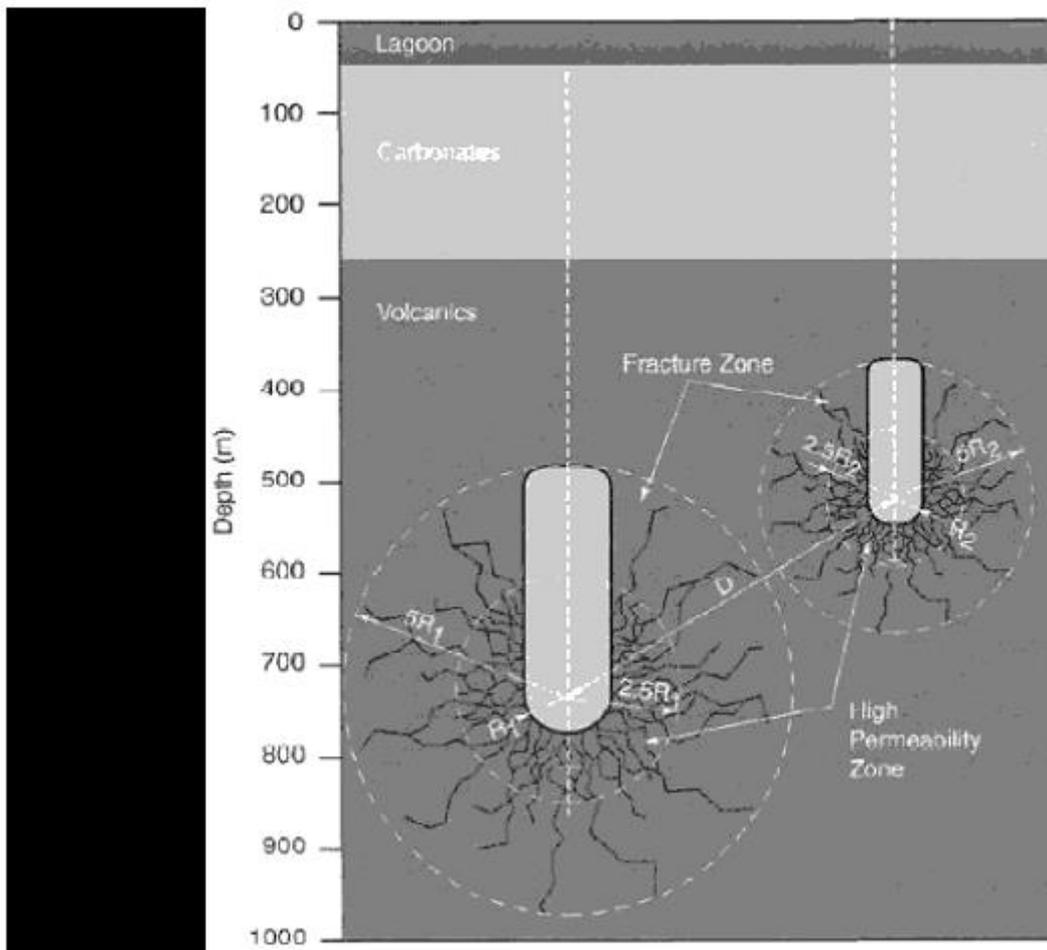
El atolón de Fangataufa es aproximadamente de forma rectangular, con esquinas redondeadas y un eje diagonal de aproximadamente 10 km de longitud, como se muestra en la figura abajo. La laguna es

significativamente más pequeña y menos profunda que la de Mururoa, con un volumen de 5,5 108 m³ y un área de superficie de 36 km², produciendo una profundidad media de alrededor de 15 m, aunque puede alcanzar una profundidad de 45 m en algunos lugares. En su estado natural, Fangataufa tenía pases al mar claramente definidos, aunque hay muchas hoas en la costa occidental. Un pase fue cortado a través del borde norte a mediados de la década de 1960 y ampliado a mediados de la década de 1980 a un ancho de 100 metros y una profundidad de 8 m. El tiempo de lavado de la laguna es de unos 30 días y la entrada diaria a través de las hoas representa alrededor del 30%. La figura siguiente presenta una visión aérea de Fangataufa.

Fangataufa

Las "experiencias nucléaires" en Mururoa y Fangataufa fueron de dos tipos: 178 ensayos nucleares, y 15 ensayos de seguridad. La primera prueba nuclear se llevó a cabo el 2 de julio de 1966, y fue de un 28 kilotones, un dispositivo montado en una barcaza en la laguna del atolón de Mururoa. Tres pruebas más montadas barcas la siguieron, dos en Mururoa y una en la laguna de Fangataufa. Durante los ocho años siguientes, otros 34 dispositivos explotaron en la atmósfera, suspendidos de globos atados por encima de los atolones (31 en Mururoa y 3 en Fangataufa), y otras 3 fueron lanzadas desde aviones en las proximidades de Mururoa. La prueba más grande fue artefacto termonuclear de 2,6 (Mt), Canopus, que fue detonada 520 m sobre Fangataufa el 24 de agosto de 1968. La última prueba atmosférica, Tauro, llevada a cabo el 14 de septiembre de 1974, fue un dispositivo de 0,3 Mt que explotó 433 metros sobre Mururoa. De las 46 experiencias nucleares realizadas, 41 fueron ensayos nucleares - 37 en Mururoa y 4 en Fangataufa - y 5 fueron ensayos de seguridad que se llevaron a cabo entre 1966 y 1974 en los motus de Colette, Ariel y Vesta, del extremo norte del atolón de Mururoa.

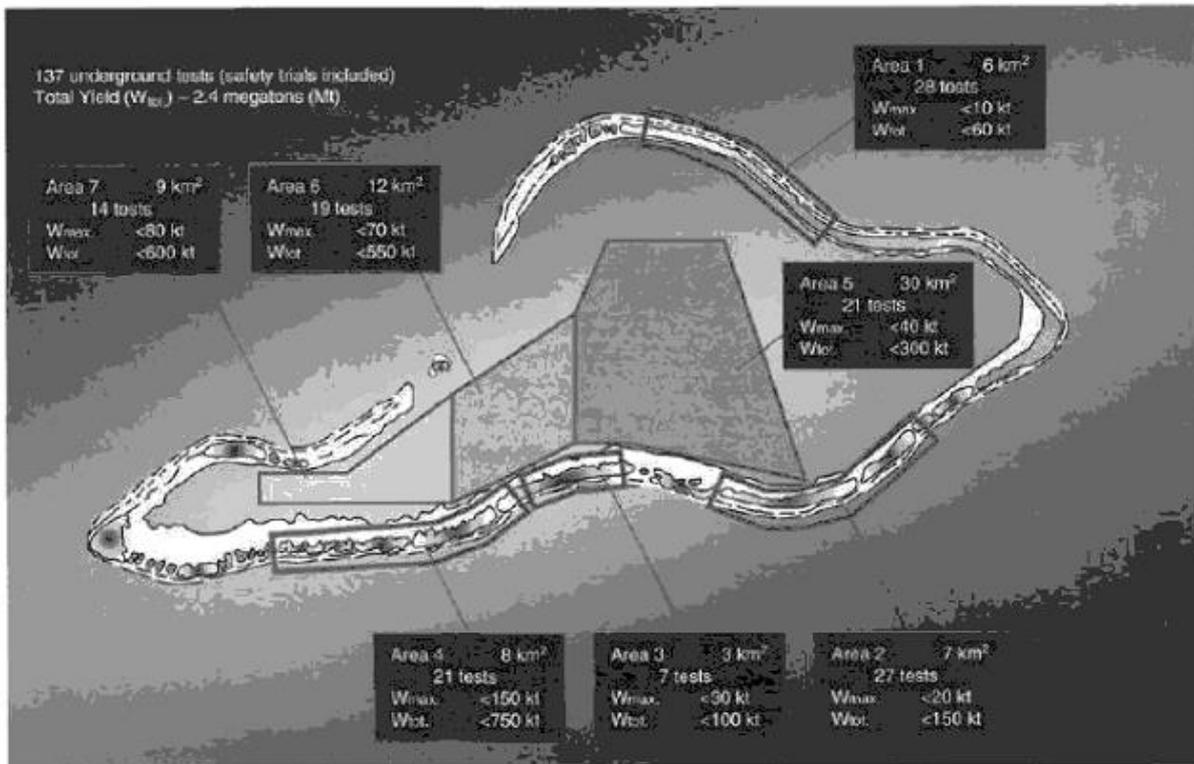
Los ensayos subterráneos se introdujeron en 1975 y se prolongaron hasta enero de 1996. En total hubo 137 pruebas nucleares subterráneas en Mururoa y 10 en Fangataufa - y 10 ensayos de seguridad que se llevaron a cabo en Mururoa. Hasta 1981, todas las pruebas se llevaron a cabo en pozos perforados verticalmente en la roca volcánica bajo el borde de coral. Ver Figura siguiente:



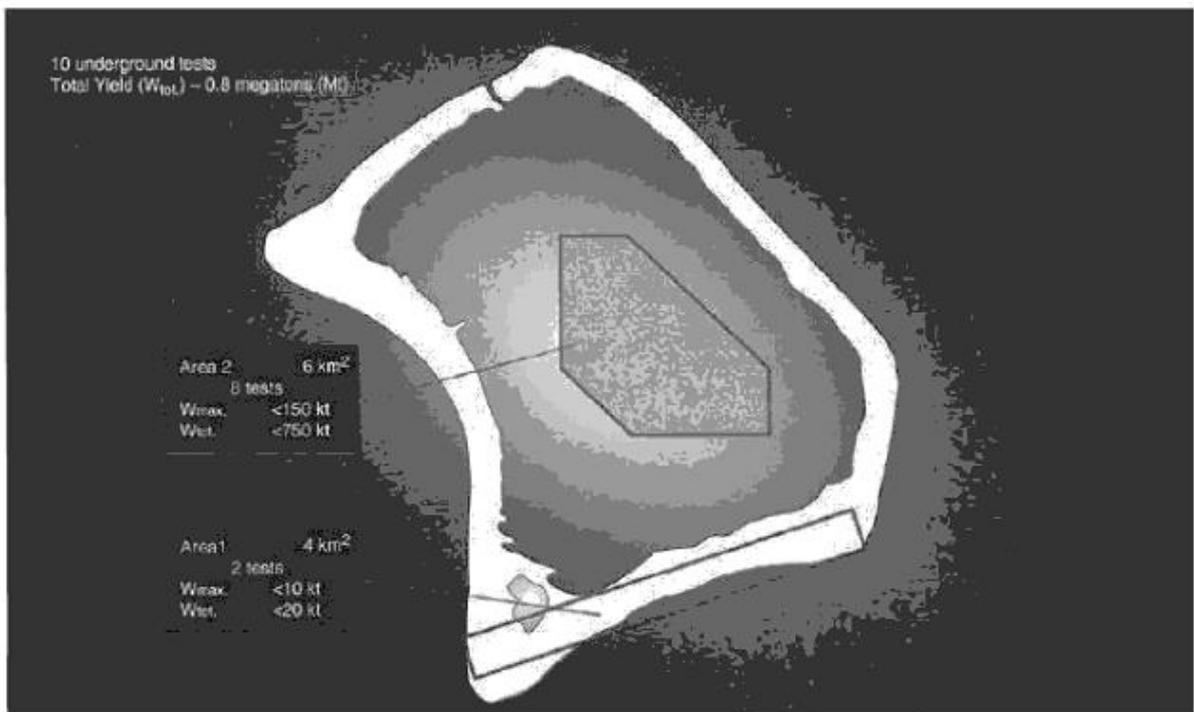
A partir de entonces , el limitado espacio disponible en Mururoa, y la evolución de las técnicas de perforación, condujeron a las pruebas nucleares en las lagunas, con el primero de ellas en Mururoa, el 10 de abril de 1981. Todas las pruebas a partir de 1987 se llevaron a cabo bajo las lagunas, aunque más de un ensayo de seguridad subterránea se llevó a cabo bajo el borde de Mururoa. El rendimiento total de todas las pruebas subterráneas fue de 2,4 Mt en Mururoa y 0,8 Mt en Fangataufa.

El número y el rendimiento de los ensayos subterráneos y ensayos de seguridad en Mururoa y Fangataufa se resumen en las siguientes figuras

Para Mururoa:

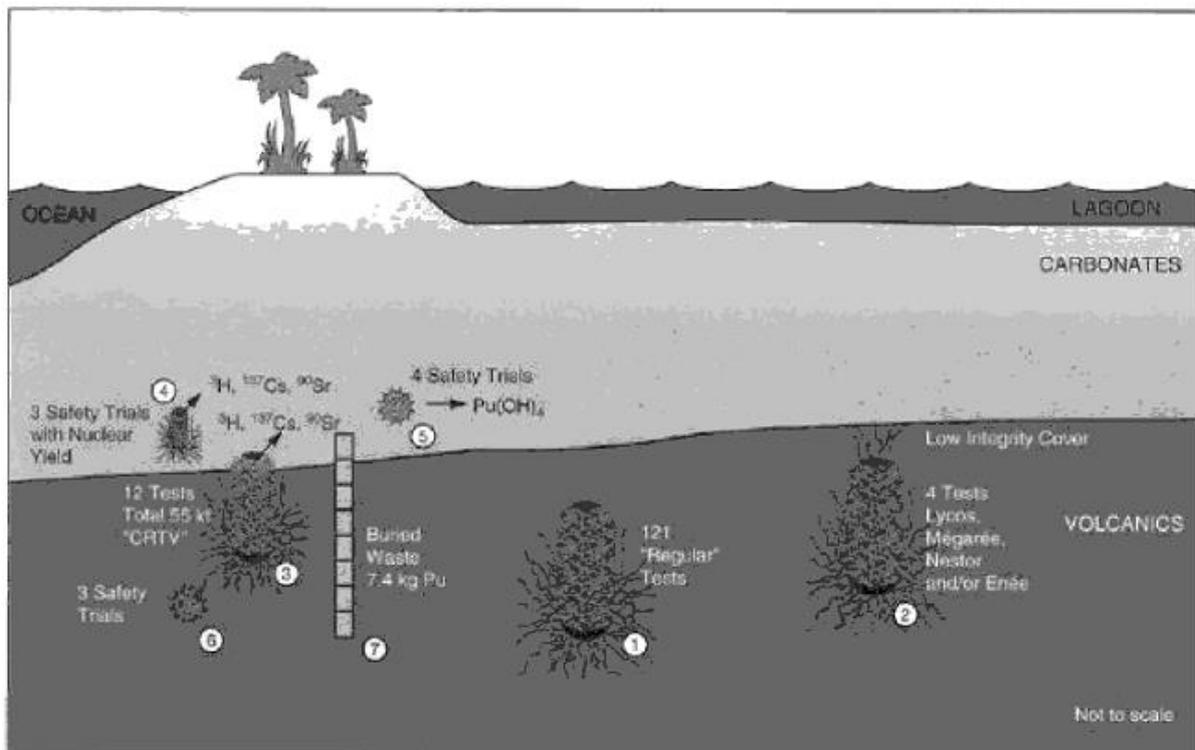


Para Fangataufa:



Bajo tierra, las pruebas se realizaron en diferentes profundidades y condiciones, dando lugar a diferentes clases de transporte de

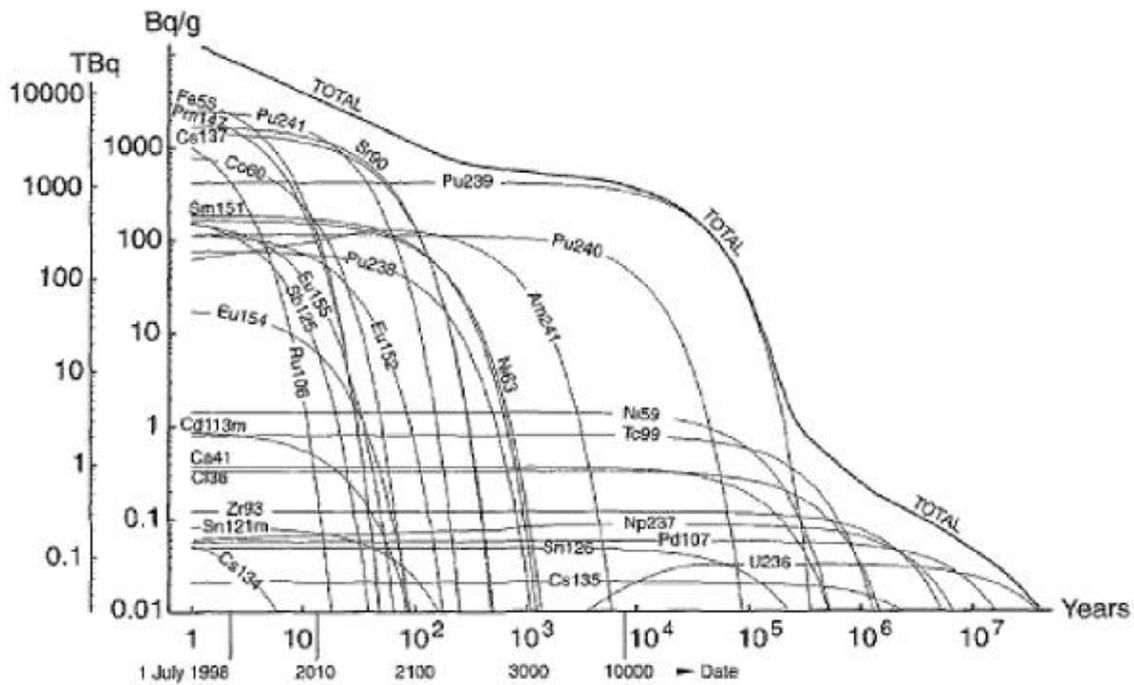
radionucleidos a través de la geosfera y, finalmente, en la hidrosfera, como se muestra en la siguiente figura.



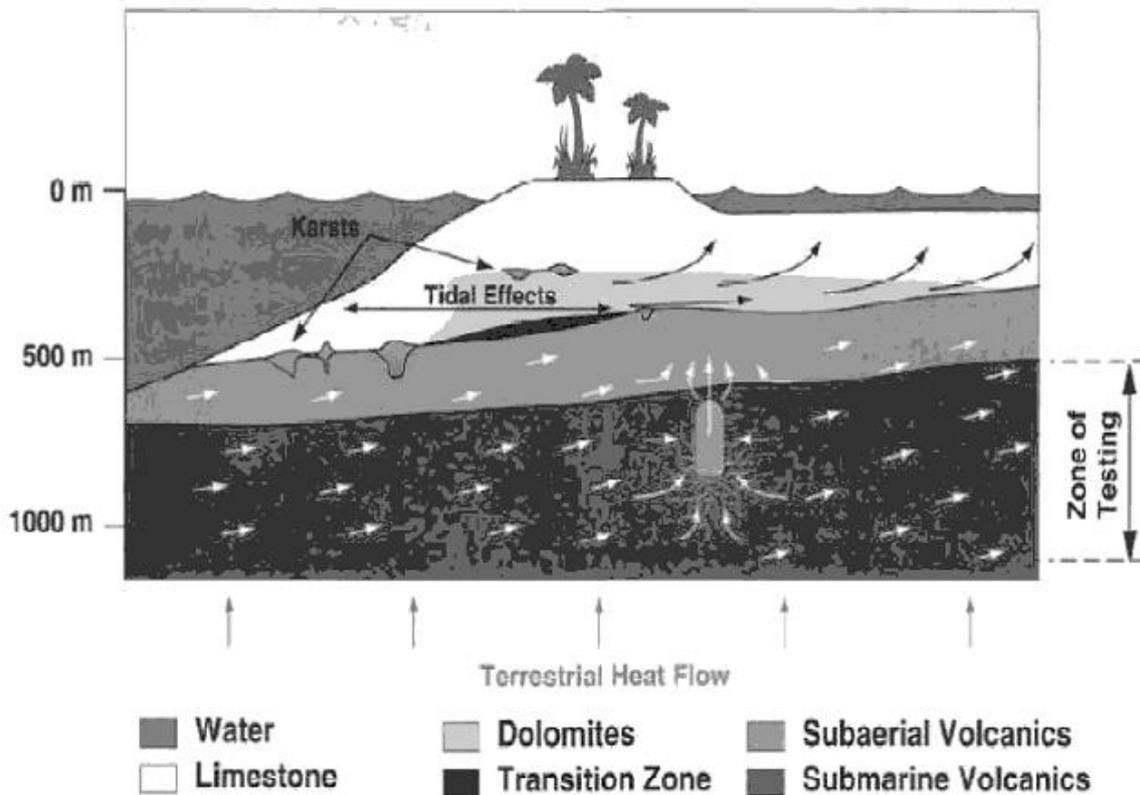
La situación actual en relación con la aportación de la prueba en Mururoa y Fangataufa a los vertidos radiactivos en los mares es el siguiente:

Asumiendo un tiempo de rotación media de 0,25 años para el agua de la laguna de Mururoa (volumen $4,7 \cdot 10^9 \text{ m}^3$) y las concentraciones básicas correspondientes para cada radionucleido en aguas oceánicas, los inventarios existentes implican tasas de liberación de la laguna de 5,100 GBq por año de ^3H , 18 GBq por año de ^{90}Sr , 57 GBq por año de ^{137}Cs y 6,4 GBq por año de $^{238, 239, 240}\text{Pu}$. Para la laguna de Fangataufa, los inventarios implican tasas de liberación de la laguna de 560 GBq por año de ^3H , 86 GBq por año de ^{90}Sr , 53 GBq por año de ^{137}Cs y 4,6 GBq por año de $^{238, 239, 240}\text{Pu}$.

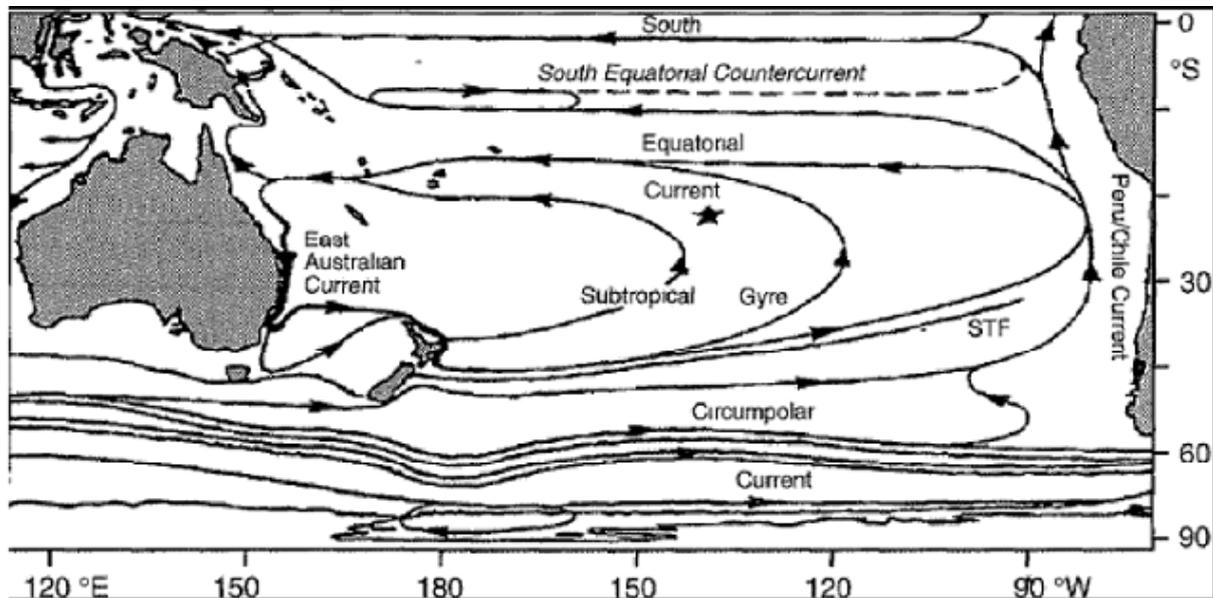
Por lo que respecta al inventario restante de las pruebas subterráneas, la actividad total y específica de los radionucleidos en lava solidificada como una función del tiempo (despreciando la lixiviación) se presenta en la siguiente figura.



Este inventario está contenido en las formaciones geológicas del atolón y decaerá como se indica en la figura, pero con el paso de los milenios eventualmente se filtrará en los mares. (Ver la siguiente figura)



Estas contaminaciones del Océano Pacífico no tendrán repercusión significativa alguna en la Argentina. Las corrientes marinas del Pacífico tienden a diluir esa radioactividad hacia el Pacífico Norte y Oeste y no hacia las corrientes polares, tal como muestra la siguiente figura.



IV.3.4. Descargas accidentales de instalaciones militares

Se han producido accidentes en instalaciones nucleares militares, pero rara vez son reportados y no se conoce su impacto sobre la radioactividad de los mares. Uno de ellos se produjo en el establecimiento Winscale en el Reino Unido en 1957 y dio lugar a una importante liberación de materiales radiactivos a la atmósfera parte de los cuales terminó en los mares. Otro fue el llamado accidente Kyshtym que tuvo lugar en 1957 en el Complejo de Producción Mayak Materiales Nucleares, ubicada en la región de Chelyabinsk, en la antigua Unión Soviética. El accidente de Chernobyl ha quedado registrado como un accidente de la energía nuclear civil; sin embargo, Chernobyl era una planta de doble uso porque si bien producía energía eléctrica que se utilizaba en actividades civiles, también era una importante productora de material fisible para usos militares –de todos modos, el accidente de Chernobyl será discutido separadamente en esta memoria.

El 1957 se produjo un accidente en las instalaciones de Windscale que se conocen actualmente como Sellafield. Los dos primeros reactores militares de los reactores de Windscale eran conocidos como Windscale Pile 1 y Windscale Pile 2. Los reactores eran moderados con grafito y refrigerados por soplado de aire frío a través de los canales en el grafito. Hubo un

incendio en la pila 1 el 10 de octubre 1957, que destruyó el núcleo y lanzó al aire radioactividad estimada en 750 TBq de la cual con fracción significativa se depositó sobre los mares. Se ha denunciado que los registros meteorológicos oficiales pueden haber sido alterados, en un intento de ocultar el hecho de que, a lo largo de la fuga de radioactividad, el viento soplaba hacia el mar, lo que hubiere aumentado significativamente la contaminación para el mar de Irlanda.

El accidente Kyshtym ocurrió en 1957 y fue causado por un fallo en el sistema de refrigeración de un tanque de almacenamiento que contenía desechos radiactivos líquidos ricos en ^{90}Sr , lo que condujo a una explosión química y una gran liberación de radionucleidos. La actividad total dispersa fuera de las instalaciones sobre el territorio de las regiones de Chelyabinsk, Sverdlovsk y Tyumen fue de aproximadamente 74 PBq donde el radionúclido dominante era el ^{90}Sr . En parte se depositó en el área de drenaje del río Techa, un afluente del río Ob. Debido a la distancia entre la planta de Mayak y el Mar Ártico sólo una pequeña fracción de los radionucleidos más móviles dados de alta de Mayak puede haber llegado al mar de Kara

IV.3.5. Buques Militares de Propulsión Nuclear

Al final de la Guerra Fría en 1989, había más de 400 submarinos de propulsión nuclear y otras embarcaciones operativas o en construcción, lo que representa cerca de 500 reactores nucleares. El número de buques militares de propulsión nuclear es menor que el número de reactores porque la mayoría de los submarinos de la antigua Unión Soviética actual Federación de Rusia tiene dos reactores, mientras que los submarinos de otros países suelen tener un reactor a bordo. Unos 250 de estos submarinos ahora están fuera de servicio y algunas órdenes canceladas, debido a los programas de reducción de armas.

Hoy en día hay cerca de 190 reactores en buques militares de propulsión nuclear en todo el mundo. De ellos, la Federación de Rusia tenía en 2007 alrededor de 50 buques militares activos que incluyen unos 3 buques de superficie y cerca de 48 submarinos que representan a unos 100 reactores.. La marina EE.UU. tenía en 2008 unos 50 submarinos nucleares y 11 portaaviones de propulsión nuclear el Reino Unido 13 submarinos, Francia 11 submarinos y 1 portaaviones y China 8 submarinos. Brasil y la India han avanzado los programas de construcción de submarinos de propulsión nuclear.

La información disponible indica que ha habido cinco accidentes confirmados relacionados con buques de guerra de propulsión nuclear que se han traducido en una pérdida de material radiactivo y la liberación significativa de radionucleidos al medio ambiente marino.

Se ha confirmado que 6 submarinos nucleares se han perdido debido a accidentes desde 1963 en varios lugares en el Océano Atlántico: dos de la Armada EE.UU., Trillador en 1963 y Escorpion en 1968; tres de la Armada de la Unión Soviética, K- 8 en 1970, K - 219 en 1986, K -278 Komsomolets en 1989 y un submarino de la Federación de Rusia, K -141, Kursk que se hundió en las aguas poco profundas en el 2000.

Con la excepción del accidente para el submarino ruso Kursk, la profundidad en los sitios de los accidentes, por lo general por debajo de 1.500 metros, no ha permitido la recuperación de ninguno de los submarinos o de sus reactores nucleares. El Kursk, que se hundió a una profundidad de 108 m en el Mar de Barents se emergió en octubre de 2001 para luego ser y desguazado.

Se han llevado a cabo mediciones radiológicas en muestras de agua de mar, sedimentos y organismos marinos profundos recogidos cerca de los diferentes sitios de los accidentes pasados. Hasta el momento, el monitoreo ha mostrado elevación significativa en los niveles de radionucleidos en algunas mediciones de ^{60}Co detectadas en muestras de sedimento recolectadas cerca de los submarinos Scorpion y Thresher y mediciones de ^{137}Cs en agua y muestras de sedimentos cerca de los restos del naufragio de los Komsomolets.

A continuación se describe brevemente en orden cronológico cada accidente submarino conocido.

> En 1961 un accidente de radiación grave se produjo en el Atlántico noroccidental a bordo del submarino nuclear se K- 19 de la antigua Unión Soviética. Algunos miembros de la tripulación fueron sobreexpuestos y el submarino fue remolcado a la base. Los compartimientos del reactor junto con dos reactores fueron posteriormente cortados y arrojados en la Bahía Abrosimov de Nueva Zembla.

> El submarino nuclear de EE.UU. Trillador se perdió en el mar en 1963 al sureste de Cape Cod, Massachusetts, y los 129 hombres a bordo perecieron en 2.560 metros de agua. El reactor nunca fue recuperado.

> El submarino nuclear EE.UU. SSN- 583 " Scorpion" tuvo un accidente en 1968 y se hundió en el mar. Los 99 hombres a bordo perecieron.

> En 1970 en el Golfo de Vizcaya a bordo del submarino nuclear K- 8 de la antigua Unión Soviética se inició un incendio y los dos reactores nucleares fueron apagados.

Como resultado del fuego, las juntas de goma en el casco fallaron y el agua de mar entró en el interior del submarino el que posteriormente se hundió durante una tormenta. > En 1985 el trabajo de reabastecimiento en el submarino nuclear K -431 en un muelle en el Astillero de la Armada Chazhma Bay (Lejano Oriente ruso) ocurrió un accidente de criticidad explosivo en el compartimiento del reactor. Como resultado, aproximadamente 185 TBq , principalmente radionucleidos de vida corta se liberaron a la atmósfera y una fracción se depositó en las aguas de la Bahía.

> En 1986 , el submarino nuclear K- 219 de la antigua Unión Soviética se hundió a unos 1000 km al nordeste de las Bermudas en el Océano Atlántico. Una explosión ocurrió a continuación. Durante el fuego, ambos reactores fueron cerrados. Después de ser remolcado por un buque mercante soviético se hundió a una profundidad de 6.000 m. > En 1989 en el Mar de Noruega, a 180 km al sur- este de la isla de la Isla del Oso, el submarino nuclear " Komsomolets " tuvo un accidente y se hundió.

> Durante el anclaje de un submarino no identificado de la Flota del Norte de la Unión Soviética en la Bahía Ara un accidente dio lugar a una contaminación radiactiva de la zona marítima aledaña.

> En 1989, hubo un accidente grave a bordo del ruso K- 159 en el Mar de Noruega . El accidente produjo la fusión parcial del reactor, exposición a la radiación de la tripulación y descargas de radioactividad en el mar y la atmósfera.

> En 2000 , a raíz de una fuga de agua refrigerante de las tuberías en el compartimiento del reactor, el submarino de propulsión nuclear " HMS Tireless " del Reino Unido entró en Gibraltar para la evaluación de la reparación . Según la información proporcionada por el Ministerio de Defensa del Reino Unido, aunque se descargó en el mar Mediterráneo refrigerante, no se filtró desde el submarino agua contaminada.

> En 2000, el submarino nuclear ruso K -141 " Kursk " se hundió en las aguas del mar de Barents a 140 km de la ciudad de Severomorsk, en la península de Kola. De acuerdo a la información del gobierno ruso, el " Kursk " no llevaba ojivas nucleares en el momento del accidente, y los reactores se cerraron cuando el submarino se hundió y no hubo liberación de sustancias

radiactivas. Los 118 miembros de la tripulación a bordo en el momento del accidente murieron. El " Kursk " fue emergido en 2001, remolcado hasta el almacenamiento y posteriormente vaciado de combustible en 2003.

> En 2001, el USS Greenville (SSN -722) golpeó accidentalmente y hundió un gran buque escuela de entrenamiento pesquero japonés Ehime Maru, matando a nueve japoneses a bordo , entre ellos cuatro estudiantes.

> En 2002, menos de un año después de chocar con Ehime Maru Greenville chocó con USS Ogden (LPD- 5) durante una transferencia de personal frente a las costas de Omán. Después de la colisión, ambos buques se retiraron del lugar por sus propios medios.

> En 2002 , el submarino HMS Trafalgar Reino Unido (S -107) , encalló cerca de la isla de Skye en Escocia. Viajaba a 50 metros debajo de la superficie a más de 14 nudos , y debido a un fallo de navegación chocó con las rocas en Fladda Chuain .

> En octubre de 2003, el Hartford (SSN- 768), de la Marina de los Estados Unidos de la clase Los Angeles encalló durante la realización de maniobras de rutina en el puerto de La Maddalena, Cerdeña.

> En julio de 2006, el submarino clase Victor III - K -448 " Tambov " sufrió una fuga en el primer circuito de reactor en la base Vidayevo en la región de Murmansk . El reactor fue cerrado. Sigue siendo incierto si la fuga causó la contaminación nuclear en la bahía Vidayevo.

> En 2007 dos marineros murieron y otros resultaron heridos a bordo de un submarino HMS Tireless Reino Unido después de una explosión durante el uso de un sistema de ventilación de seguridad. El accidente se produjo mientras el HMS Tireless estaba en ejercicios con la Marina de los EE.UU. bajo la capa de hielo polar.

A todos estos accidentes hay que sumar los que involucraron a buques nucleares de superficie de los que no se disponen tantos datos.

Se estima que la operación y accidentes de buques militares de propulsión nuclear han sido grandes contribuyentes de radiactividad antropogénica a los mares

IV.3.6. Faros Nucleares

En algunas aplicaciones militares (o duales) se utilizan generadores termoeléctricos de radioisótopos (RTG) como generadores de calor para producir electricidad en faros transmisores de señales acústicas en alta mar

y en tierra, pero más a menudo como simples faros para la navegación. Un RTG típica contiene aproximadamente 1 PBq de ^{238}Pu o alrededor del 10 de PBq ^{90}Sr .

Ha habido muchos faros militares en aguas rusas remotas, en Alaska y en otras partes del mundo, inclusive en la Antártica, impulsados por RTG y hasta unos 500 RTG han estado en uso. A principios de 2008 había un total de 520 faros RTG en funcionamiento, 220 de ellos administrados por el Ministerio de Defensa de Rusia y situado a lo largo del Báltico, el Ártico y las costas del Pacífico. Los demás, unos 300 estaban bajo la administración marítima civil, asegurando el paso del noreste. La actividad total actual de ^{90}Sr de faros RTG en Rusia asciende a 916 PBq. Recientemente sin embargo han ocurrido actos de vandalismo en varios de ellos, y recrudece la posibilidad de acciones terroristas. En la última década, se han hecho los esfuerzos internacionales para reemplazar todos los RTG con fuentes de energía con menores riesgos.

Se han producido incidentes con RTG con pérdida de radioactividad en el mar. Un incidente se produjo en 1987, con un RTG desechado conteniendo 25.3 PBq de ^{90}Sr , que fue encontrado en 2004 en un 25-30 m de profundidad a una milla de la orilla del Ártico. Un RTG conteniendo 1.3 PBq de ^{90}Sr se perdió en 1997 en el Mar de Okhotsk cerca del cabo Maria en la isla Sakhalin. El gobierno ruso puso en marcha una búsqueda. El área de eliminación es muy poco profunda (3-5 metros) pero muy grande (unos 25 m²).

IV.3.7. Satélites y naves espaciales

Fuentes de energía nuclear se utilizan en algunos tipos de naves espaciales y en los satélites militares y han sido contribuyentes importantes de radioactividad antropogénica en los mares.

Hay dos tipos de fuentes de energía nuclear que están disponibles para satélites y naves espaciales: los generadores termoeléctricos de radioisótopos (RTG) y reactores nucleares. En RTG el radionúclido más comúnmente utilizado es ^{238}Pu con una vida media de 87,7 años. RTG que contienen ^{90}Sr con una vida media de 28,3 años también se han utilizado ampliamente. Una RTG típica contiene aproximadamente 1 PBq de ^{238}Pu o alrededor del 10 PBq de ^{90}Sr . Los RTG también se han utilizado en las

transmisiones de señales como faros de aguas profundas, pero hoy en día se utilizan principalmente para las misiones espaciales.

Para satélites militares con mayores demandas de energía se utilizan reactores nucleares. Por ejemplo, los reactores nucleares han sido ampliamente utilizadas por la Unión Soviética en una parte de su serie de satélites Cosmos. Se han puesto en marcha más de treinta satélites de propulsión nuclear de la serie Cosmos. Al final del tiempo de operación, el procedimiento normal es impulsar el satélite a una órbita más alta, con una vida útil de al menos 500 años, para permitir la descomposición de los productos de fisión antes de que el satélite con su reactor nuclear vuelva a entrar en la atmósfera de la tierra y se quema arriba. Los datos disponibles muestran que se han registrado cuatro reentradas accidentales de satélites de propulsión nuclear, y una re- entrada accidental de una nave espacial; directa o indirectamente estos accidentes causaron liberación de radioactividad a los mares, a saber:

> En 1964 el satélite de navegación " Tránsito 5BN- 3 " de EE.UU. con un generador de radioisótopos SNAP- 9A conteniendo 630 TBq de ^{238}Pu metálico volvió a entrar en la atmósfera y quemó sobre el Océano Índico occidental al norte de Madagascar. El combustible nuclear se vaporizó durante el reingreso y se dispersó por todo el mundo depositándose mayormente en los mares.

> En 1968, la nave espacial " Nimbus B- 1 " de los EE.UU. conteniendo dos generadores de radioisótopos SNAP- 19 no alcanzó la órbita debido a un fallo de refuerzo en el lanzamiento. La nave espacial cayó con el generador en el Canal de Santa Bárbara en la costa de California. Se informó que las dos cápsulas de combustible radioactivo conteniendo un total de 1.265 TBq de ^{238}Pu se recuperaron intactas a una profundidad de 100 m .

> En 1970, después de un lanzamiento exitoso, se produjo un mal funcionamiento en el suministro de oxígeno a bordo de la nave espacial tripulada "Apollo 13 " en su camino a la luna. Los astronautas regresaron a la Tierra con el módulo de aterrizaje lunar adjunto. El módulo de aterrizaje, con un generador de radioisótopos SNAP- 27 que contiene 1,63 PBq de ^{238}Pu , volvió a entrar en la atmósfera sobre el Océano Pacífico Sur y terminó en las profundidades del océano al sur de las Islas Fiyi en el entorno de la fosa de Tonga.

> El 18 de setiembre de 1977, la ex unión soviética lanzó su satélite alimentado con un reactor nuclear Cosmos 954 para vigilancia naval. Este satélite se desintegró sobre Canadá en 1978, resultando una polución radiactiva sobre un área del tamaño de Austria. Canadá pidió a Rusia que se le proveyera información sobre especificaciones del Cosmos 954. Rusia respondió, ofreciéndose a limpiar los restos de su Satélite Cosmos 954. Canadá declinó

la oferta soviética. La unión de Estados Unidos y Canadá para limpiar, fue lo que se llamó "operación luz de la mañana". Canadá facturó a Rusia por seis millones de dólares en 1979, pero no buscó que se le reintegraran los gastos norteamericanos que habían ascendido hasta los 25 millones de dólares. El incidente del Cosmos 954 en 1978, dio pautas sobre cómo deben comportarse los Estados con respecto a los accidentes de satélites; esas pautas se relacionan con las obligaciones de: a) el deber de poner sobre-aviso; b) el deber de proveer información; c) el deber de limpiar; y d) el deber de compensar los daños. Pero no existen pautas sobre que hacer cuando esto vuelva a ocurrir sobre el mar.

> ¡Y volvió a ocurrir! En 1982 después de completar la misión del satélite de imágenes radar " Cosmos 1402 ", la URSS no logró impulsar su reactor nuclear en una órbita más alta . La nave espacial se dividió en tres partes, una de las cuales volvió a entrar y quemarse en la atmósfera el 30 de diciembre de 1982. La segunda parte volvió a entrar en el 23 de enero 1983 en el Océano Índico y la tercera parte que contiene el núcleo del reactor (productos de fisión que se estima ser de hasta 1 PBq) volvió a entrar y se rompió sobre el Atlántico Sur el 07 de febrero 1983 cerca de 1600 km al este de Brasil. > En 1996 , la Federación de Rusia lanzó la Estación Interplanetaria Automática "Mars 96 ", pero como consecuencia de una falla entró a la atmósfera y cayó en el Océano Pacífico al oeste de Chile. La "Mars ' 96" contenía 18 RTG de ^{238}Pu con una actividad total de 174 TBq.

IV.3.8. Armas Nucleares Perdidas

Las armas nucleares han sido diseñadas para ser transportados por submarinos, buques de superficie, aviones y cohetes. A principios de 2008 ocho estados con armas nucleares poseían casi 10.200 armas nucleares operacionales. Varios miles de estas armas nucleares se mantienen en estado de alerta, listas para ser lanzadas en cuestión de minutos. Si se cuentan todas las ojivas nucleares, ojivas operativas, repuestos, las de almacenamiento tanto activa como inactiva, y ojivas intactas programadas para el desmantelamiento después, estos estados en conjunto poseen un total de más de 25 000 ojivas .

Han ocurrido accidente que terminaron con armas nucleares contribuyendo a la radioactividad de los mares. Algunos fueron los siguientes:

> En junio de 1962, dos misiles Thor con dispositivos de ensayos nucleares fueron lanzados por los EE.UU. desde la isla de Johnston. El primero de ellos se perdió por el sistema de seguimiento y el misil con su cabeza de guerra

fue destruido. El segundo, fue recibido por una parada de motor y fue destruido en la altura de 9100, y 10700 m causando una cantidad considerable de radioactividad con plutonio que cayó en el mar alrededor de la isla de Johnston.

> En diciembre de 1965 un avión A- 4 de EE.UU. cargado con un arma nuclear salió del ascensor de su portaaviones y cayó en el mar abierto en las proximidades de la isla de Okinawa, Japón, hundiéndose a una profundidad de alrededor de 5.000 metros. El piloto, el avión y las armas se perdieron.

> En 1966 un EE.UU. bombardero B-52 y un avión de reabastecimiento KC - 135 colisionaron en el aire cerca de la localidad de Palomares, en España . El B- 52 se estrelló. De las cuatro armas termonucleares transportadas por la aeronave, una cayó en el océano y fue recuperada el 7 de abril de 1966, otra fue recuperada intacta de los campos donde había aterrizado, mientras que las dos restantes fueron destruidas por el impacto. Un área de 2.26 km² fue contaminada por plutonio.

> En 1968 un bombardero B -52 de EE.UU. se estrelló en el hielo cerca de la base aérea de Thule en el norte de Groenlandia con cuatro armas nucleares que fueron destruidas, causando una gran difusión de plutonio en una amplia zona del hielo.

> En 1968 el submarino diesel K- 129 de la antigua Unión Soviética, que llevaba dos torpedos con cabezas nucleares y tres cohetes ICBM, se perdió en el océano Pacífico, cerca de las islas de Hawai. En 1974 la parte de proa (tres compartimentos de este submarino con ojivas nucleares) fueron emergidos por el RV " Glomar Explorer" de EE.UU.

> En 1982, durante el conflicto Malvinas entre el Reino Unido y Argentina un misil alcanzó al destructor " HMS Sheffield" de Reino Unido. Veinte miembros de su tripulación murieron y el barco fue abandonado. Se ha sugerido que el barco tenía armas nucleares a bordo cuando se hundió.

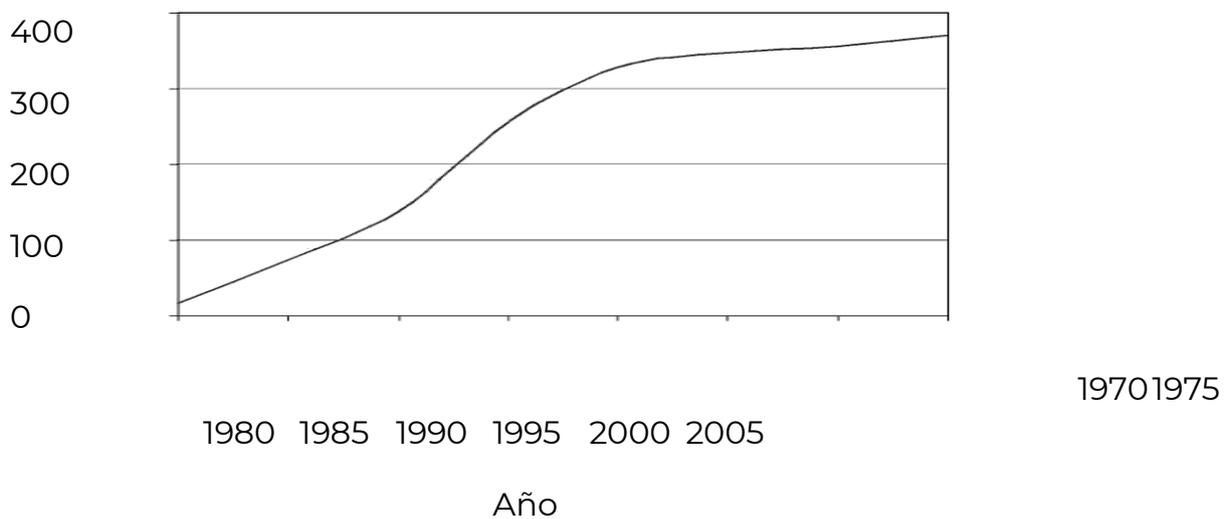
IV.4. LA GENERACIÓN NUCLEOELÉCTRICA

IV.4.1. Introducción

La producción de energía eléctrica a partir de centrales nucleares genera efluentes radioactivos muchos de los cuales terminan en los mares. Esta generación ha crecido de manera constante desde que surgió la industria en 1956 y, aunque se viene registrando un aumento en la retirada de servicio

de los reactores más antiguos, la producción de energía eléctrica sigue creciendo tal como lo muestra la figura siguiente:

Capacidad instalada (gigavatios eléctricos)



Las descargas radioactivas a los mares pueden provenir de cualquier etapa del ciclo del combustible nuclear, el comprende las etapas siguientes: la extracción y tratamiento del uranio y su conversión en combustible nuclear, la fabricación de elementos combustibles, la producción de energía en una central nuclear, el almacenamiento o reelaboración del combustible irradiado, el transporte entre las diversas etapas y el almacenamiento y eliminación de los desechos radiactivos. Tanto las descargas de sustancias radioactivas la mar como las dosis de radiación ionizante recibidas por las personas expuestas varían ampliamente de un tipo de instalación a otra, y

entre los distintos emplazamientos, pero todos estos pasos tienen el potencial de contribuir al vertido de radioactividad a los mares.

El UNSCEAR publica información sobre las liberaciones de material radiactivo al medio ambiente de todos los pasos del ciclo del combustible nuclear. En particular, los datos globales para los vertidos de las plantas de energía nuclear son muy completos. En caso de vertidos de otras actividades la información es menos completa. Aquí solo se dará un detalle sucinto de alguna de estas actividades.

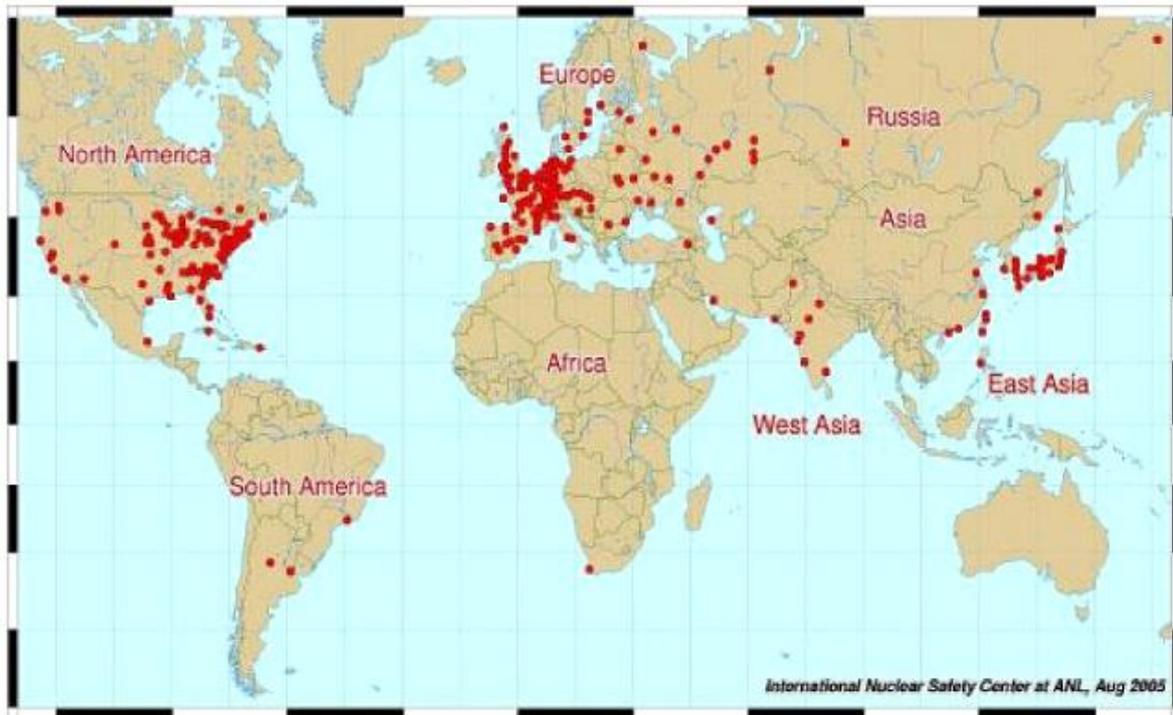
IV.4.2. Extracción y tratamiento de uranio

La extracción y el tratamiento del uranio producen cantidades sustanciales de residuos en forma de desechos de tratamiento o colas. Hasta 2003, la producción mundial total de uranio fue de unos 2 millones de toneladas, mientras que los desechos de tratamiento

llegaron a más de 2.000 millones de toneladas. La minería del uranio se lleva a cabo en varios países por minería subterránea (40 %), la minería a cielo abierto (39 %) y lixiviación in situ (13 %). Los principales efluentes son la emisión de gas radón en la atmósfera y la liberación de algunos emisores alfa de larga vida como efluentes líquidos. Sin embargo, ya que la mayoría de las instalaciones se encuentran tierra adentro y, a menudo en zonas áridas hay poco potencial de emisiones al medio ambiente marino. En la actualidad, las pilas de desechos se mantienen adecuadamente, aunque existen muchos antiguos emplazamientos abandonados y sólo en unos pocos de ellos se han adoptado las medidas correctivas correspondientes.

IV.4.3. Operaciones centrales núcleo-eléctricas

La siguiente figura muestra la ubicación de las más de 400 centrales núcleo-eléctricas que están operando en el mundo, se puede apreciar que la mayoría están ubicadas en sitios costeros marinos.



La mayoría de los reactores de potencia son del tipo moderado y refrigerado por agua ligera, aunque en algunos países se utilizan otros diseños. El UNSCEAR ha presentado datos de descarga de más de 400 plantas de energía nuclear. Las descargas líquidas de tritio, material que por su dispersibilidad es importante para estimar las descargas a los mares, se presentan por separado, mientras que las descargas de todos los demás radionucleidos a menudo se describe colectivamente. La descarga anual estimada de tritio en forma de líquido a partir de estas plantas de energía nuclear es de 17 PBq . Esto incluye las emisiones a los ríos, así como a los mares costeros. La descarga anual estimada total de otros radionucleidos en los efluentes líquidos de las plantas de energía nuclear es de 8 TBq .

IV.4.4. Las plantas de procesamiento de combustible

El procesamiento de combustible se lleva a cabo para recuperar el uranio y el plutonio del combustible gastado para su reutilización en los reactores. Habitualmente, el combustible gastado de los reactores se mantiene en un lugar de almacenamiento provisional, en espera de decisiones sobre su disposición final o almacenamiento recuperable. Sólo un 5 % y un 10 % del combustible se somete a la fase de reelaboración del ciclo del combustible nuclear. Hay 13 plantas de procesamiento de combustible en operación. Las instalaciones de Sellafield, Reino Unido y La Hague, Francia, juntas representan el 90 % de la capacidad de procesamiento comercial del mundo. Estas dos plantas son costeras y descargas sustancias radioactivas

al mar. Las plantas de reprocesamiento de Rusia se encuentran tierra adentro y sólo pequeñas cantidades de sus efluentes llegan a los mares árticos.

Relativamente grandes cantidades de materiales radioactivos están involucrados en la etapa de reprocesamiento de combustible. Los radionucleidos son liberados de su estado como el combustible y se ponen en solución, y la posibilidad de una liberación de las descargas de residuos es mayor que para las otras etapas del ciclo del combustible. Descargas de rutina han sido en gran parte en los efluentes líquidos al mar.

Desde mediados de la década de 1970, cuando se produjo el pico en las descargas de radioactividad de emisores alfa y beta de la planta de reprocesamiento de Sellafield en el Mar de Irlanda, los niveles se han reducido por la introducción de tecnología de extracción.

Las descargas líquidas anuales al mar estimadas son 17 PBq de ^3H , 21 TBq de ^{14}C , 27 TBq de ^{90}Sr , 26 TBq de ^{106}Ru , 2 TBq de ^{129}I y 8 TBq de ^{137}Cs .

IV.4.5. Plantas de producción y enriquecimiento de combustible nuclear

No existen datos globales para las liberaciones de estas plantas, pero los datos regionales recogidos por la Comisión OSPAR indica que la suma de los vertidos procedentes de una instalación de cada tipo es de aproximadamente 0,2 TBq de radionucleidos emisores alfa y 100 TBq de emisores beta).

- **PRODUCCIÓN Y USO DE RADIOISÓTOPOS**

La producción y uso de radioisótopos en medicina y en la industria es posiblemente la mayor generadora de radioactividad antropocéntrica. Sin embargo, los radionucleidos generados son de vida relativamente corta, con pocas excepciones están todos por debajo de la década. Es por eso que esta importante actividad no será considerada en esta memoria porque se estima que no es significativa para la temática global de la radioactividad de los mares por los motivos explicitados anteriormente. Por ejemplo, los radionucleidos más utilizados en el diagnóstico y la terapia médica son el $^{99\text{m}}\text{Tc}$ y el ^{131}I , respectivamente. Ambos radionucleidos se descargan con frecuencia en formas líquidas. Los datos se limitan a las emisiones mundiales de su producción y uso. Ambos son de corta duración, con una vida media de 6 horas el $^{99\text{m}}\text{Tc}$) y 8 días el ^{131}I no se los considera significativos para la radioactividad de los mares.

- **MARINA CIVIL**

El uso de la energía nuclear para la propulsión marina civil a sido muy limitada y se ha concentrado fundamentalmente en el uso de rompehielos. En la marina mercante, es decir como en barcos usados para el comercio y el turismo, la propulsión nuclear ha sido utilizada muy poco y por muy poco tiempo.

En general los reactores nucleares que se utilizan para propulsar buques nucleares son por lo general de de diseño no muy diferente a la versión más grande utilizado en plantas de energía eléctrica nucleares. Desde el lanzamiento de la primera nave civil de propulsión nuclear en 1959, once buques nucleares civiles adicionales accionados por energía nuclear han sido utilizados.

La primera nave civil de propulsión nuclear, fue el rompehielo de la URSS Lenin que fue lanzado el 5 de diciembre de 1959 y dado de baja en 1990. La siguiente tabla muestra todos los buques de propulsión nuclear civiles

Pais	Tipo y nombre del navio	Puesta en servicio	Fuera de servicio
USSR/Federación	<i>Rompehielos</i>		
Rusa	Lenin	1959	1990
	Arctica	1975	2008
	Sibir	1977	1993
	Rossia	1985	En operación
	Sovetsky Soyus	1989	En operación
	Taymir	1989	En operación
	Vaigach	1990	En operación
	Yamal	1993	En operación
	50 Let Popedy	2007	En operación
	<i>Contenedores</i>		
	Sevmorput	1988	2007
EEUU	<i>Barco mercante</i>		
	Savannah	1962	1970
Alemania	<i>Barco mercante</i>		
	Otto Hahn	1968	1982
Japón	<i>Barco Mercante</i>		
	Mutsu	1974	1992

No hay datos exhaustivos sobre los vertidos radiactivos procedentes de buques de propulsión nuclear civiles.

IV.7. TRANSPORTE DE MATERIALES NUCLEARES

Varios tipos de materiales radiactivos se transportan por mar. Estos incluyen el hexafluoruro de uranio, uranio enriquecido, combustible nuclear gastado, residuos de alta actividad solidificados, así como material radioactivo para uso médico tal como el cobalto-60 utilizado en aparatos de radioterapia. Sin embargo, los accidentes marítimos relacionados con el transporte de materiales radiactivos han sido raros. Los ocurridos han tenido poco impacto porque el transporte está regulado por normas internacionales graves muy estrictas (el Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos del OIEA). Sin embargo, se produjeron algunos accidentes sin consecuencias significativas, a saber:

> En 1997 se accidentó el "MSC Carla ", a 70 millas náuticas al norte de las Azores, perdiendo tres paquetes que contenían fuentes selladas de cloruro de cesio con una actividad total de 326 TBq

> En 1978 , durante el transporte de residuos sólidos radiactivos de baja y media actividad con una actividad total de 140 TBq de Sr- 90 el buque ligero "Nikel " de la ex URSS se perdió en una tormenta, a 20 kilómetros al noroeste de Kolguyev Island en el sur- este del mar de Barents.

> En 1984, el transporte de carga " Mont Louis " chocó con un Ferry a 20 kilómetros de Zeebrugge y se hundió en aguas poco profundas. Entre la carga, había 30 contenedores de hexafluoruro de uranio enriquecido. Para octubre 1984 todos los contenedores fueron recuperados.

IV.8. ELIMINACIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS EN EL MAR

La descarga de residuos radioactivos sólidos y de líquidos (que un fueran efluentes) en el mar no ha sido normal. Sin embargo, aunque en el mar no se han evacuado estos desechos radiactivos rutinariamente por todos los países y de todas las actividades, en más de 50 lugares de la parte norte de los Océanos Atlántico y Pacífico algunos países han vertido diversas cantidades de desechos radiactivos de actividad baja embalados. Su procedencia es confusa pero se sospecha que la mayoría proviene de operaciones militares o duales.

En 1946 se realizó el primer vertimiento en un lugar del Océano Pacífico nororiental situado a unos 80 kilómetros de la costa de California. El último vertimiento conocido se efectuó en 1982 en un lugar ubicado en el Océano Atlántico a unos 550 kilómetros de la plataforma continental europea. El siguiente mapa presenta la distribución mundial de los lugares de vertimiento en el mar utilizados para la evacuación de desechos.



Se estima que, entre esas dos fechas, 63 PBq, de desechos radiactivos aparentemente provenientes de investigaciones varias fueron embalados, generalmente en tambores de metal forrados con una matriz de hormigón y betún, y se arrojaron al mar. Parte de este inventario comprende cierta cantidad de desechos no embalados y desechos líquidos que se evacuaron de 1950 a 1960. Radionucleidos emisores de radiación beta y gamma representaron más del 99% de la radiactividad total de los desechos arrojados al mar. Se trataba de productos de fisión y activación, tales como el estroncio-90m, el cesio-137, el hierro-55, el cobalto-58, el cobalto-60, el yodo-125, el carbono-14 y el tritio. Estos radioisotopos equivalen a un tercio de la radiactividad total vertida en los lugares del Atlántico nororiental. Pero los desechos evacuados también contenían pequeñas cantidades de nucleidos emisores alfa de los cuales el plutonio y el americio representaban un 96%. Los residuos líquidos se vertieron principalmente en el Ártico y el Pacífico. Los residuos sólidos, en su mayoría envasados, fueron vertidos en el Atlántico, Ártico y Pacífico.

Las operaciones de vertimiento se realizaron bajo el control de las autoridades nacionales del Mecanismo multilateral de consulta y vigilancia de los países miembros de la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (AEN/OCDE), es decir de los países industrializados (La Argentina no forma parte de la AEN; en Latinoamérica son Estado Parte solo Chile y Méjico). La AEN también creó en un programa coordinado de investigación y vigilancia ambiental

para el lugar de vertimiento de la AEN en el Atlántico nororiental. Desde entonces, el lugar de vertimiento del ha sido anualmente objeto de una vigilancia no permanente. Cada cierto tiempo se realiza un estudio radiológico y hasta ahora, las muestras de agua marina, sedimentos y organismos de las aguas profundas que se han tomado en no han revelado exceso alguno en los niveles de los radionucleidos con respecto a los originados por las precipitaciones debidas a las armas nucleares, con excepción de algunas ocasiones en que se detectaron cesio y plutonio de actividades más altas en las muestras tomadas cerca de los bultos en los sitios de vertimiento.

Además de estas operaciones, las que continuaron hasta 1993, fueron arrojadas al mar vasijas de reactores nucleares, con y sin combustible. Los reactores nucleares sin combustible fueron eliminados en el Atlántico, Ártico y Pacífico, mientras que los reactores nucleares con combustible fueron eliminados sólo en el mar de Kara en el Océano Ártico.

En resumen, los siguientes tipos de residuos radiactivos fueron eliminados en el mar durante este período: residuos líquidos en tambores, residuos sólidos, y recipientes de presión de reactores nucleares , con y sin combustible. Los residuos radiactivos sólidos fueron eliminados en el mar de la siguiente manera: (a) los residuos de bajo nivel, tales como papel y textiles de procesos de descontaminación, resinas y filtros, etc, solidificados con cemento o alquitrán y envasados en recipientes de metal; y, (b) residuos radiactivos sólidos sin empaquetar, principalmente grandes partes de instalaciones nucleares, como generadores de vapor, bombas del circuito principal, tapas de los recipientes de presión del reactor, etc. Los recipientes de los reactores que fueron eliminados en el mar comprendieron: recipientes sin combustible nuclear de la antigua Unión Soviética y los EE.UU.; y, recipientes conteniendo combustible nuclear gastado dañado por la antigua Unión Soviética. Estos recipientes de presión del reactor se llenaron generalmente de un agente de solidificación a base de polímero (furfural) para proporcionar una barrera de protección adicional. Además la antigua Unión Soviética arrojó al mar un contenedor especial con combustible nuclear gastado dañado del rompehielos Lenin

El vertedero del Atlántico Nordeste, utilizado hasta 1982 por los Estados miembros de la OCDE/NEA, ha sido objeto de monitoreo periódicamente desde 1977. El informe final se publicó en 1996. El OIEA también participó en las mediciones específicas del sitio en este sitio junto con el Bundesforschungsanstalt für Fischerei (BFA) de Alemania y el Laboratorio

de Pesca del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Pesca del Reino Unido, mediante el análisis de las muestras recogidas anteriormente de los fondos marinos de los principales sitios de radionucleidos antropogénicos tales como ^{14}C , ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu y ^{241}Am . El análisis mostró actividades en los lugares de vertimiento que sugieren fugas medibles pero impacto radiológico controlable.

La Agencia de Protección Ambiental y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los EE.UU. llevan a cabo monitoreos radiológicos de los sitios del Nordeste del Pacífico y el noroeste del océano Atlántico. Hasta el momento, las muestras de agua de mar, sedimentos y organismos marinos profundos recogidos cerca de los diversos sitios no han mostrado ningún exceso significativo en el nivel de los radionucleidos, excepto en ciertos casos en que se detectaron los isótopos de cesio y plutonio en elevados niveles en las muestras de sedimentos tomadas cerca de los bultos radioactivos arrojados.

Expediciones rusas noruegas conjuntas visitaron cuatro principales sitios de desechos vertidos radiactivos en el mar de Kara en el Ártico en el período 1992-1994. Se recogieron muestras de agua de mar, sedimentos y biota para el análisis de la actividad. Los resultados de estas expediciones mostraron que la influencia de los desechos radiactivos vertidos en los niveles generales de contaminación radiactiva en el mar de Kara era no significativa, pero, las muestras de sedimentos tomadas en la vecindad inmediata de los contenedores de residuos mostraron niveles elevados de ^{60}Co , ^{90}Sr ,

^{137}Cs y ^{239}Pu , ^{240}Pu .

La ex Unión Soviética también arrojó residuos radiactivos en los mares del Lejano Oriente aunque, a diferencia del Ártico, no fueron arrojados allí reactores que contienen combustible. Expediciones conjuntas japonesas - coreanas - rusas fueron llevadas a cabo durante 1994 y 1995 y tomaron muestras de agua de mar, sedimentos de los fondos marinos y biota de los vertederos y de los sitios de referencia. Los resultados muestran concentraciones elevadas pero no significativas de ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu y ^{239}Pu , ^{240}Pu en los mares del Lejano Oriente.

IV.9. LOS ACCIDENTES NUCLEARES

La industria núcleo-eléctrica ha sufrido tres accidentes significativos. El accidente de Three Mile Islands en los EE.UU., el accidente de Chernobyl en

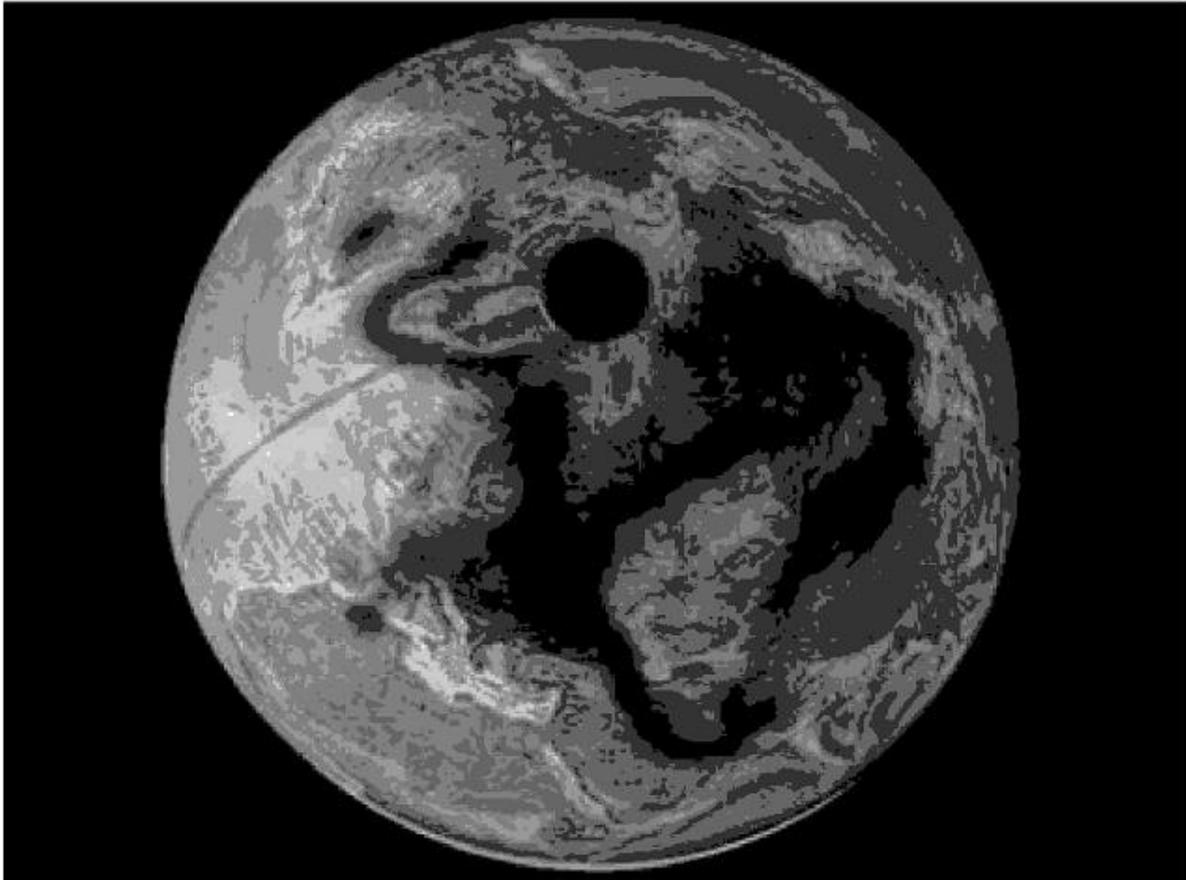
la ex. USRR y el accidente de Fukushima en Japón. El primero es irrelevante para esta memoria porque no liberó radioactividad al medio ambiente.

IV.9.1. El Accidente de Chernobyl

El accidente ocurrido en 1986 en la central nuclear de Chernobyl, en la antigua Unión Soviética, ha sido el más grave de ese tipo en la historia de la utilización de la 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 el síndrome de radiación aguda, que culminó en la muerte de 28 de ellos. Posteriormente, varios cientos de miles de trabajadores participaron en las actividades de recuperación y muchos fueron expuestos a dosis de radiación significativas..

El accidente provocó la mayor emisión radiactiva incontrolada al medio ambiente jamás registrada hasta entonces por las actividades civiles; en unos diez días se liberaron en la atmósfera grandes cantidades de sustancias radiactivas. La nube radiactiva provocada por el accidente se dispersó sobre todo el hemisferio septentrional y depositó una gran cantidad de material radiactivo sobre extensas zonas de la antigua Unión Soviética y otras partes de Europa, contaminando la tierra, el agua y la biota y ocasionando trastornos sociales y económicos particularmente graves a grandes sectores de la población de los países que hoy se conocen como Belarúsia, la Federación de Rusia y Ucrania.

Si bien la dispersión fue masiva y afectó a gran parte del hemisferio, casi toda se depositó sobre tierra firme –como puede verse en la siguiente figura



Dos radionúclidos, el yodo 131 de período corto (con un período de semidesintegración de ocho días) y el cesio 137 de período largo (con un período de semidesintegración de 30 años), revistieron particular importancia debido a la dosis de radiación que provocaron en la población. Sin embargo, las dosis recibidas fueron muy diferentes entre ambos radionúclidos, ya que las dosis tiroideas debidas al yodo 131 llegaron a varios gray en pocas semanas después del accidente, mientras que el cesio 137 provocó dosis corporales de hasta varios cientos de milisiervert pro integrados a largo plazo durante los años posteriores.

En la antigua Unión Soviética, la contaminación de la leche fresca con yodo 131 y la no adopción de medidas inmediatas dieron lugar a altas dosis tiroideas, en particular en los niños. A más largo plazo, sobre todo debido al radiocesio, la población general también quedó expuesta a las radiaciones, tanto externamente debido a depósitos radiactivos como internamente por el consumo de alimentos contaminados. No obstante, las consiguientes dosis de radiación a largo plazo fueron relativamente bajas (la dosis adicional media en el período de 1986 a 2005 en las “zonas contaminadas” de Belarús, la Federación de Rusia y Ucrania (Las “zonas contaminadas” fueron definidas arbitrariamente por la antigua Unión Soviética como las zonas en que los niveles de cesio 137 en el suelo eran superiores a 37

kilobequerelios por metro cuadrado) fue de 9 mSv, es decir, un valor aproximadamente equivalente al de la dosis provocada por un examen médico de tomografía computadorizada) y no debería producir efectos sanitarios notables en la población general que pudieran atribuirse a las radiaciones. No obstante, los graves trastornos provocados por el accidente tuvieron importantes consecuencias sociales y económicas y ocasionaron gran sufrimiento a las poblaciones afectadas.

Desde que ocurrió el accidente, la comunidad internacional ha realizado esfuerzos sin precedentes para evaluar la magnitud y las características de sus efectos sanitarios relacionados con las radiaciones. Muchas iniciativas, en particular las emprendidas por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

UNESCO), la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Comisión Europea, estuvieron destinadas a ayudar a comprender mejor las consecuencias del accidente y contribuir a su mitigación. Los resultados de esas iniciativas se resumieron en una conferencia internacional dedicada al tema titulado “Una década después de Chernobyl: Recapitulación de las consecuencias radiológicas del accidente”, que se celebró en Viena del 8 al 12 de abril de 1996, que fue presidida por la actual Canciller de Alemania, Angela Merkel. En las evaluaciones científicas internacionales se llegó a conclusiones similares en términos generales respecto de la magnitud y el carácter de las consecuencias del accidente.

En su informe de 2000 a la Asamblea General de la ONU, el UNSCEAR describió detalladamente la situación según se conocía en ese momento. Después de publicado ese informe, ocho organizaciones y organismos del sistema de las Naciones Unidas y los tres Estados afectados pusieron en marcha el Foro Sobre Chernobyl con la finalidad de generar declaraciones de consenso autorizadas sobre las consecuencias sanitarias y medioambientales atribuibles a la exposición a las radiaciones y brindar asesoramiento sobre cuestiones tales como la reparación del medio ambiente, la ejecución de programas especiales de atención médica y la realización de actividades de investigación. La labor del Foro Sobre Chernobyl fue valorada en una conferencia internacional sobre el tema titulado “Chernobyl: Mirar atrás para avanzar, en pos de un consenso de las Naciones Unidas sobre los efectos del accidente y el futuro”, que se celebró en Viena los días 6 y 7 de septiembre de 2005. En esa conferencia se corroboraron en lo fundamental todas las evaluaciones anteriores de la

magnitud y el carácter de las consecuencias sanitarias del accidente debidas a las radiaciones.

Si bien en estos momentos se dispone de un considerable volumen de nuevos datos de investigación, las principales conclusiones respecto de la magnitud y la naturaleza de las consecuencias sanitarias del accidente de Chernobyl son las siguientes:

- Un total de 134 trabajadores de la central y de emergencia recibieron altas dosis de radiación que les hizo padecer del síndrome de radiación aguda, muchos de ellos también sufrieron lesiones en la piel a causa de la irradiación beta;

- Las altas dosis de radiación provocaron la muerte de 28 de esas personas en los primeros meses posteriores al accidente;

- Aunque en 2006 habían muerto 19 sobrevivientes del síndrome de radiación aguda, esas muertes se debieron a distintas causas que normalmente no se vincularon con la exposición a las radiaciones;

- Entre las principales secuelas padecidas por los sobrevivientes del síndrome de radiación aguda figuraron las lesiones en la piel y las cataratas relacionadas con las radiaciones;

- Además de los trabajadores de emergencia, varios cientos de miles de personas participaron en las operaciones de recuperación pero, aparte de las señales de aumento de la incidencia de leucemia y catarata en las personas que recibieron las dosis más elevadas, en la actualidad no existen pruebas firmes de efectos sanitarios que puedan atribuirse a la exposición a las radiaciones;

- 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. Respecto del período 1991-2005, se comunicaron más de 6.000 casos, de los cuales una importante proporción podría atribuirse al consumo en 1986 de leche contaminada con yodo 131 . Aunque la incidencia del cáncer del tiroides sigue aumentando en ese grupo (véase en la figura X la tendencia registrada en Belarús), hasta 2005 sólo 15 de esos casos habían sido mortales;

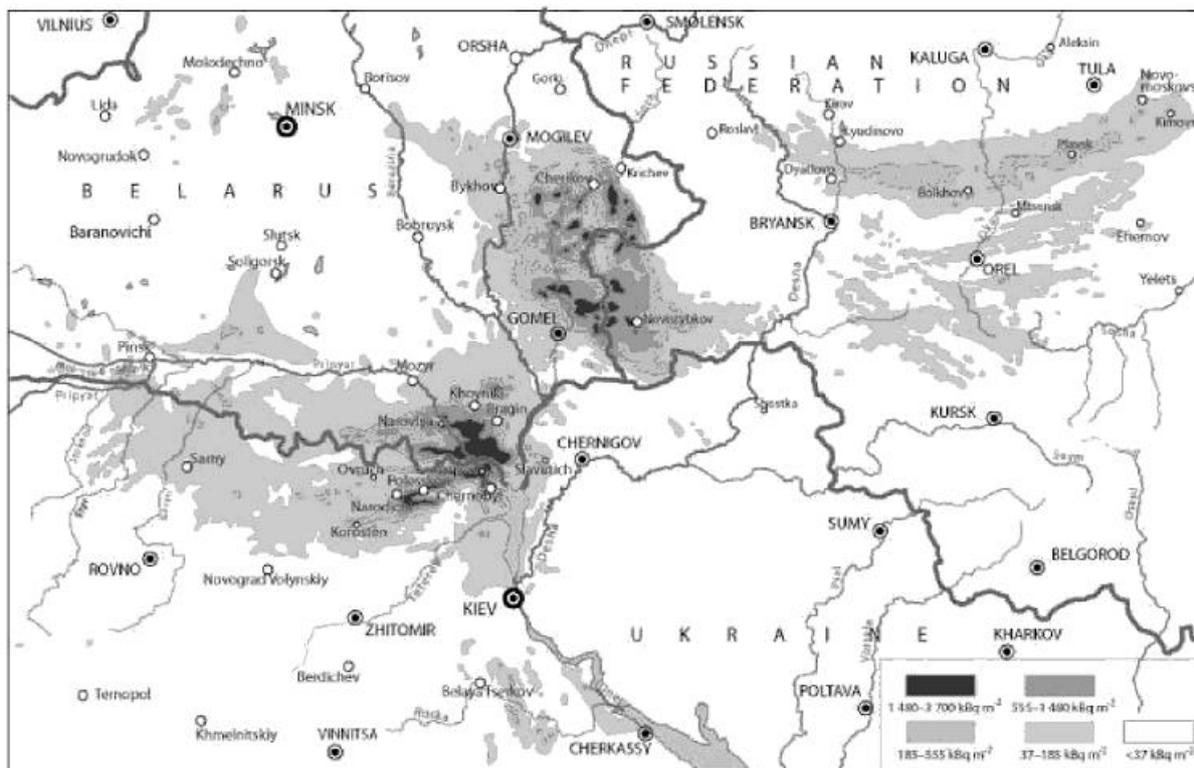
g) En cuanto a la población general, hasta la fecha no existen pruebas firmes de ningún otro efecto sanitario que pueda atribuirse a la exposición

a las radiaciones. Aunque se han publicado predicciones basadas en modelos en relación con posibles aumentos de la incidencia del cáncer sólido en la población general, en todos los grupos de población estudiados las dosis son relativamente bajas y comparables con las dosis debidas a la exposición a la radiación de fondo natural. Se ha decidido no utilizar modelos para proyectar cifras absolutas sobre los efectos padecidos por las poblaciones expuestas a dosis bajas debido a incertidumbres inaceptables en las predicciones.

En resumen, en lo fundamental, las personas que siendo niños estuvieron expuestas al radioyodo a causa del accidente de Chernobyl y los trabajadores que participaron en las actividades de emergencia y recuperación y que recibieron altas dosis de radiación corren mayores riesgos de sufrir efectos inducidos por las radiaciones. La mayoría de los residentes de la zona quedaron expuestos a una radiación de actividad baja comparable a los niveles de radiación de fondo natural anual, o varias veces superior a éstos, y no tienen que vivir temiendo sufrir consecuencias sanitarias graves.

Ahora bien, ¿que se puede decir en cuanto a la contribución de Chernobyl a la radioactividad de los mares?

Como se indicó anteriormente la emisión de radioactividad al ambiente fue inmensa. La mejor estimación de la actividad total de todo el material radiactivo liberado en el accidente es de alrededor de $12 \cdot 10^{18}$ Bq: fueron liberados cerca de 3-4 % del combustible usado en el reactor en el momento del accidente, así como hasta el 100% de los gases nobles y un 20-60% de los radionucleidos volátiles. La composición de radionucleidos de los materiales liberados en el accidente fue compleja. Dos elementos químicos dominaron las consecuencias el yodo y cesio. El yodo- 131 no sería significativo para el propósito de este informe dado que su actividad cae a la mitad cada ocho días. De los isótopos radiactivos de cesio, ^{134}Cs y ^{137}Cs , el más importante es el último, un nucleido longevo con vida media de 30 años. Las estimaciones para la actividad de ^{137}Cs liberado fue de $90 \cdot 10^{15}$ Bq . La mayoría del material se depositó en la región alrededor del complejo industrial cuya área de drenaje es el río Dniéper, con amplias variaciones en la densidad de deposición. El material se transportó a través de la atmósfera a grandes distancias, depositándose de forma variable sobre vastas áreas, principalmente en Europa central como puede verse en el mapa siguiente.



Pero una fracción finalmente llegó a los mares, directamente por drenajes de las zonas contaminadas o en forma de lluvia de la emisión atmosférica.

El mar más afectado fue el Báltico, ya que las primeras nubes radioactivas de Chernobyl viajaron hacia el norte y causaron alta deposición en los países nórdicos. El cesio-137 concentración media en las aguas superficiales marinas estimados para el año de referencia 1990 fue la más alta en el Mar Báltico. Los niveles de cesio-137 de este mar se han mantenido los más altos de Europa, debido a su naturaleza cerrada y su pequeño intercambio de agua con el Mar del Norte. El rango de medición de la concentración de Cs-137 en 1986 era de hasta 2400 Bq/m², es decir, dos a tres órdenes de magnitud más alta que en otros mares europeos. Las descargas de los ríos continúan alimentando las concentraciones de cesio en el Mar Báltico.

El próximo mar más perturbado a raíz del accidente de Chernobyl fue el Mar Negro, donde la media de concentración de cesio-137 en agua de mar en 1990 fue de 52 Bq/m² (comparable a la causada en el Mar de Irlanda por los vertidos de Sellafield!). La mayor actividad depositada se observó en 1986, en su zona más septentrional, y fue de unos 500 Bq/m². La actividad medida de estroncio-90 en el año 1988 en las aguas superficiales del Mar Negro occidental estuvo entre 10 y 50 Bq/m². Se debe destacar que las concentraciones superficiales en aguas del Mar Egeo de tanto de cesio-137 como de estroncio-90 y eran mucho más bajas, entre 5 y 11 Bq/m². Los patrones de distribución de estroncio-90 y el cesio-137 observados en las

aguas superficiales del Mar Negro se pueden explicar en términos de dos funciones principales de origen –a saber, por una deposición atmosférica a corto plazo que dominó inmediatamente después del accidente, y luego por un transferencia a largo plazo desde el embalse de Kiev y el área de influencia de los ríos Dniéper, Dniéster y Danubio.

Para el mar Mediterráneo, la principal contribución de Chernobyl llegó entonces por intercambio de aguas con el mar Negro, que esencialmente actuó como una fuente radiactiva. Se estima que las entradas por deposición atmosférica y fluvial han desempeñado papeles menores. La concentración media de cesio-137 en el agua superficial estimada para 1990 fue de 5,7 Bq/m². Los niveles en los mares regionales del Mediterráneo oscilaron entre 2,9 y 9 Bq/m², mostrando claramente una tendencia este-este hacia los valores más altos en el Mar Egeo.

IV.9.2. El Accidente de Fukushima

El 11 de marzo de 2011, uno de los terremotos más poderosos de la historia registrada desencadenó una serie de acontecimientos que culminaron en el accidente de varios reactores nuclear en la central nuclear de Fukushima Daiichi (NPP) en Japón. El catastrófico gran terremoto del Este de Japón de 2011 y el posterior tsunami causaron gran devastación en la región oriental de Japón. Con sus enormes daños, esta combinación de eventos no se considera sólo trágica en términos de su costo humano, sino que es el desastre natural más devastador de la historia de Japón.

Como consecuencia del accidente nuclear, grandes cantidades de sustancias radiactivas, en particular de elementos volátiles, como los radioisótopos de yodo (¹³¹I, ¹³²I, ¹³³I), de cesio (¹³⁴Cs, ¹³⁶Cs, ¹³⁷Cs) y telurio (¹³²Te) y gases inertes como el xenón (¹³³Xe), se liberaron en el medio ambiente, lo que resultó en niveles relativamente altos de radiación ambiental, especialmente alrededor de la planta.

Sin embargo, diverso que en el caso de Chernobyl, la mayor cantidad de radioactividad no se dirigió a tierra firme sino a los mares, fundamentalmente al Océano Pacífico Norte. Como consecuencia del accidente la prioridad inmediata fue la protección de las personas más que el medio ambiente y esta tomando tiempo evaluar las consecuencias ambientales radiológicas del accidente. Mientras tanto, las reclamaciones de daños al medio ambiente, están surgiendo. Se necesitan estudios urgentes que evalúen el impacto del medio ambiente marino del accidente. Han sido reportados aumentos de las concentraciones de radiactividad en muestras de plancton animal en el mar cerca del lugar del accidente, cesio

radiactivo ha sido encontrado en el atún de aleta azul y muchas otras anomalías han sido reportadas.

Están en marcha varios estudios sobre la radioactividad que finalizará arrojando Fukushima al mar. Sería irresponsable predecir los resultados de esos estudios antes de su finalización. Es por eso que esta memoria no incluye la radioactividad de los mares debida al accidente de Fukushima aunque considera que será sustancial.

EPÍLOGO

PERSPECTIVAS PARA EL ATLÁNTICO SUR Y LA ANTÁRTICA

La problemática de la radioactividad de los mares parecería ajena a los intereses de la República Argentina.

Por una parte, la Argentina no presenta características hidrogeológicas que hagan sospechar que la radioactividad natural de sus mares sea peculiarmente distinta a los promedios globales. Por el contrario, por ejemplo las costas argentinas no son particularmente ricas en radioactividad natural (en comparación, por ejemplo, con las costas brasileñas cuyas playas son profusas de arenas monazíticas) y los fondos de los mares argentinos casi no presentan actividad telúrica que podría agregar grandes cantidades de materiales radioactivos naturales. En fin, que no aparecen fenómenos naturales que hagan sospechar de una mayor radioactividad natural en sitios de los mares argentinos.

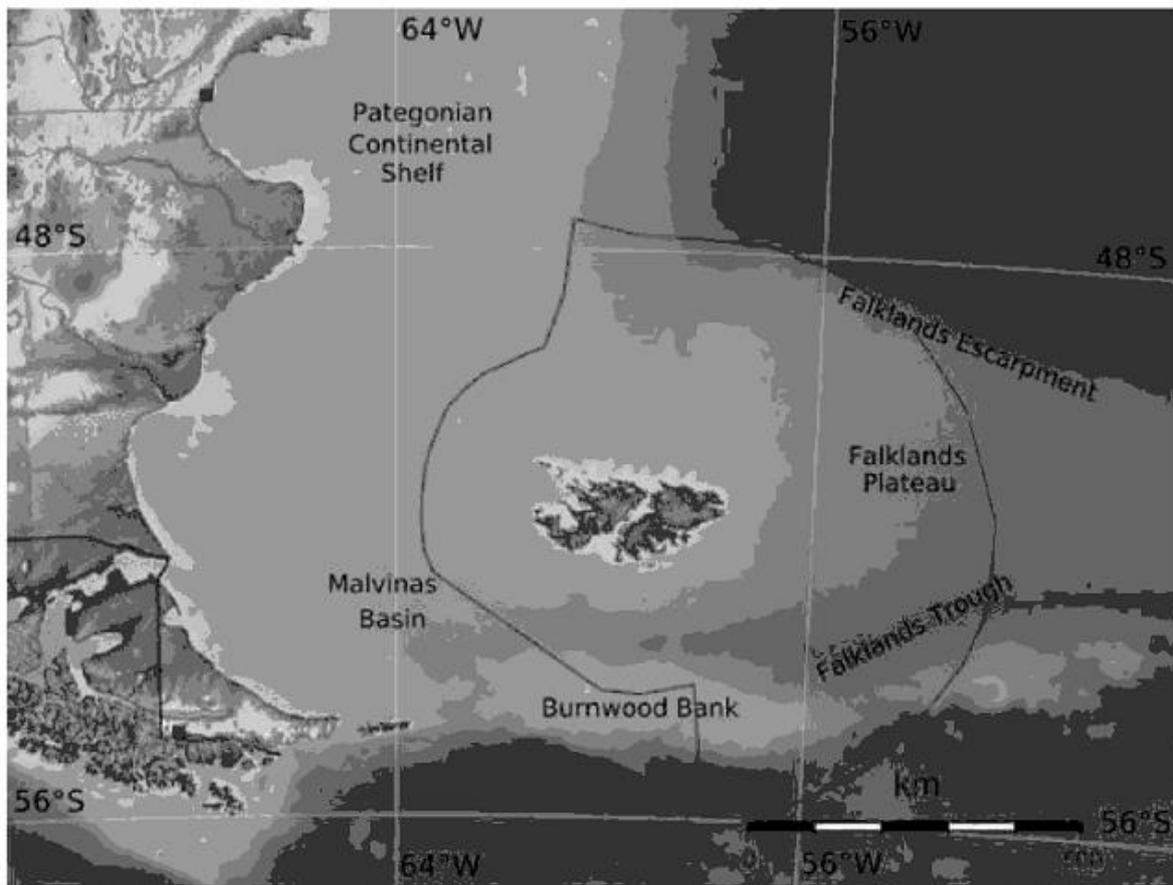
Por otra parte, la mayor radioactividad antropogénica de los mares se ha generado en el hemisferio norte y se ha arrojado a los mares del hemisferio norte. En el hemisferio sur, las únicas actividades significativas se han generado en el Océano Pacífico y no en el Atlántico y han sido infinitamente más reducidas que las del hemisferio norte.

Parecería entonces que el Mar Argentino y su proyección Antártica es una especie de oasis ambiental en el tema de la polución radioactiva de los mares.

Controlar esta situación singular, casi única en el mundo, y aprovecharla debería ser una política de Estado Argentina, la que debería defender la pureza radioactiva de sus mares no solo por motivos ambientales sino de preservación de recursos naturales para su futuro desarrollo. La Argentina es un país marítimo por excelencia y uno de los países del mundo con extensas costas marítimas.

Mientras que todos los países nucleares con costas marítimas utilizan el agua de mar para refrigerar la mayoría de sus reactores nucleares, la Argentina es el único que no lo hace. Pese a disponer de costas marítimas espaciosas y adecuadas, el país refrigera sus reactores con agua fluvial, el río Paraná, y de un lago, el Embalse del río III (este último es un caso único en el mundo). Los motivos históricos de esta rareza son varios y excede el objetivo de esta memoria discutirlos.

El control nacional de la radioactividad de los mares argentinos no debe ser considerado como un hecho automático. La dura experiencia de la Guerra de Malvinas, el uso de submarinos nucleares y el hundimiento de un buque que habitualmente transportaba armas nucleares en aguas argentinas, son ejemplos de la fragilidad de las leyes internacionales en esta materia. Hoy por hoy, existe un amplio sector del mar Argentino que no está bajo el control de Argentina (ver mapa).



Nada se sabe de la radioactividad del mar en las cercanías de las Islas Malvinas. Podría haber descargas de material militar en esa zona sin conocimiento de Argentina. De hecho existe actividades petroleras en la zona sin que Argentina sepa que tipo y cuanta radioactividad natural se esta llevando a la superficie marina.

En los años por venir la Argentina hará uso extensivo de sus mares si quiere mantener y aumentar el nivel de vida de sus habitantes. Entre otros emprendimientos, la Argentina deberá instalar varias centrales nucleares para producir la energía eléctrica que demandará su creciente población y los sitios naturales para su emplazamiento se encontraran en el mar Argentino. Es por esto, entre otros motivos, que el estudio de la radioactividad de los mares argentinos es fundamental para el devenir nacional....

.... El lugar natural para llevar a cabo esos estudios es la Academia del Mar.