

RESIDUOS RADIACTIVOS PROCEDENTES DE LOS ENSAYOS SUBTERRANEOS CON ARMAS: LA EVALUACION DE MURUROA MIGRACION DE RADIONUCLEIDOS A TRAVES DE LA GEOSFERA

POR ROBERT FRY, DES LEVINS Y ERNST WARNECKE

Tras abandonar los ensayos nucleares atmosféricos en 1974, el Gobierno de Francia realizó, entre 1975 y 1996, otros 147 experimentos nucleares debajo de los atolones de Mururoa y Fangataufa. De estos experimentos, diez fueron pruebas de seguridad (diseñadas para simular condiciones de accidentes) con poca o ninguna potencia nuclear.

En Mururoa y Fangataufa, no se realizó ninguna explosión subterránea con dispositivos nucleares de muy alta potencia. Ninguno de ellos excedió los 150 kilotonnes y, según el Gobierno de Francia, la liberación total de energía de todos los ensayos fue de 3,2 megatonnes. (*Véase el cuadro de la página 32.*) En el mundo, se han realizado más de 1800 ensayos nucleares subterráneos con una potencia total de 90 megatonnes, treinta veces la potencia notificada de los ensayos subterráneos franceses.

En los ensayos nucleares atmosféricos, la mayor parte del material radiactivo se dispersa en la atmósfera superior y, a la larga, se deposita mundialmente en forma de precipitaciones radiactivas. En cambio, los materiales radiactivos residuales, procedentes de los ensayos subterráneos quedan, en gran medida, confinados dentro de la roca hospedante, aunque existen posibilidades de una liberación de radionucleidos al medio ambiente local. Al evaluar las consecuencias radiológicas de los ensayos subterráneos, es necesario estimar las futuras liberaciones de radionucleidos desde la geosfera hacia el medio ambiente accesible en períodos

que normalmente se extienden a 10 000 años o más.

Estimar las tasas de liberación de radionucleidos desde la geosfera fue una de las tareas más complejas y desafiantes de todo el Estudio de la situación radiológica en los atolones de Mururoa y Fangataufa. Si bien el medio geológico de los atolones es, en muchas formas, único, la metodología empleada en el Estudio es aplicable a la evaluación de la migración de radionucleidos desde otros polígonos de ensayos subterráneos.

GEOLOGIA DE LOS ATOLONES

Desde una vista aérea, los atolones parecen ser menudos anillos de coral, situados a sólo pocos metros por encima del nivel del mar. En realidad, son masivas montañas submarinas volcánicas que se elevan a unos cuatro kilómetros del lecho marino y están cubiertas de varios cientos de metros de roca carbonatada (derivada de las acreciones coralinas).

Las erupciones volcánicas que condujeron a la formación de los atolones ocurrieron hace unos 11 millones de años. Alimentados por un punto caliente de la corteza terrestre, los volcanes aumentaron de tamaño y alcanzaron la superficie oceánica manteniéndose, durante algún tiempo, como volcanes subaéreos. Cuando la actividad volcánica cesó, las estructuras se sumergieron lentamente debido a su enorme peso y a la condición isostática de la Plataforma del Pacífico subyacente. Durante los períodos de glaciación, el nivel del

mar descendió hasta 120 metros, lo cual destruyó los corales y expuso el carbonato a los efectos de la erosión y lixiviación provocadas por la lluvia. Es muy probable que los karsts (zonas interconectadas de gran permeabilidad), característicos de las rocas carbonatadas, se hayan formado durante esos períodos de glaciación.

Actualmente, las rocas volcánicas están cubiertas de hasta 450 metros de roca carbonatada, cuyas partes inferiores se han convertido en dolomita debido a los procesos de intercambio diagenético con las aguas circundantes.

La base volcánica de los atolones consta de una extensa red de fisuras de diversos tamaños, básicamente lineales. Se formaron vías conductoras por una diversidad de mecanismos, por ejemplo, las intrusiones magmáticas de gran escala, los procesos de contracción del enfriamiento y fracturas más extensas (diques y capas intrusivas) producidas por inyecciones magmáticas que ocurrieron después de enfriarse la masa de roca volcánica inicial. Esta red de fracturas es el principal conducto de transporte del agua (y de radionucleidos).

El Sr. Fry fue Gerente Técnico del Proyecto del OIEA para el Estudio de la situación radiológica en los atolones de Mururoa y Fangataufa. El Sr. Levins, de la Organización de Ciencia y Tecnología Nucleares de Australia, fue Presidente del Grupo de Tareas B del Estudio. El Sr. Warnecke, funcionario del OIEA de la División de Seguridad Radiológica y de los Desechos, participó en el Grupo de Trabajo 3 del Estudio.

Las superficies de conductos en basalto, inicialmente grandes, sufren cambios químicos debidos a los flujos de agua y, a la larga, pueden quedar sellados, en parte, por productos de alteración como la arcilla y la calcita. Estos productos se caracterizan por tener una gran superficie y excelentes propiedades retentivas en algunos radionucleidos, sobre todo los elementos actínidos. Por tanto, desempeñan un papel importante en la retardación del transporte de radionucleidos a través de la geosfera.

ENSAYOS NUCLEARES Y LUGARES DONDE SE REALIZAN

La explosión nuclear subterránea funde y vaporiza la roca volcánica de los atolones en la zona inmediata al punto de detonación, formándose una cavidad casi esférica y un depósito lenticular de roca volcánica fundida al fondo de la cavidad que al enfriarse forma una lava vítrea.

La masa del material vaporizado en una explosión nuclear es de unas 80 toneladas por potencia de kilotón. La cantidad de lava que se forma varía entre 500 y 1000 toneladas por potencia de kilotón, según la característica de la roca y su contenido de humedad.

Las autoridades francesas no comunicaron al equipo del Estudio el lugar exacto de cada uno de los 147 ensayos subterráneos. Sin embargo, sí entregaron un plan de cada atolón que muestra las zonas, la cantidad, la potencia máxima y la potencia total de ensayos en cada zona.

Todos los ensayos nucleares tuvieron lugar en la roca volcánica a profundidades que fluctúan entre 500 y 1100 metros. De las diez pruebas de seguridad, todas se realizaron en una zona de Mururoa y siete en las rocas carbonatadas a profundidades de más de 280 metros. La potencia

nuclear fue baja en tres de las pruebas de seguridad efectuadas en las rocas carbonatadas.

No todos los ensayos tuvieron igual eficacia en la retención de los radionucleidos producidos por la explosión nuclear. Para facilitar los cálculos, los discretos términos fuente se agruparon en siete categorías:

Categoría 1. Un total de 121 ensayos normales para los que había suficiente grosor de roca volcánica, básicamente no dañada, por encima del techo de cada chimenea de ensayo a fin de lograr un buen confinamiento.

Categoría 2. Cuatro ensayos con un grosor de cubierta aparentemente suficiente, pero con deficiencias en la cubierta volcánica.

Categoría 3. Doce ensayos en los que la cavidad-chimenea alcanzó la parte superior de la roca volcánica.

Categoría 4. Tres pruebas de seguridad en las que hubo una potencia de fisión (muy baja), a por lo menos 280 metros de profundidad en la roca carbonatada.

Categoría 5. Cuatro pruebas de seguridad en las que no hubo potencia de fisión, a por lo menos 280 metros de profundidad en la roca carbonatada.

Categoría 6. Tres pruebas de seguridad en la roca volcánica en las que no hubo potencia de fisión.

Categoría 7. Dos pozos de evacuación excavados a profundidad en la roca volcánica, en cada uno de los cuales se evacuaron desechos que contenían 3,7 kilogramos de plutonio.

En la práctica, se comprobó que la mayor parte de la liberación a la biosfera podía atribuirse a cuatro categorías: las categorías 2,3,4 y 5.

INVENTARIO DE RADIONUCLEIDOS

El primer paso para estimar la tasa de migración de radionucleidos es determinar el inventario de

radionucleidos en el subsuelo. Los científicos franceses proporcionaron datos sobre los límites superiores de la potencia de cada zona de ensayo, que se verificaron por separado utilizando datos sísmicos independientes para cada ensayo, obtenidos en la estación sísmica de Rarotonga en las Islas Cook. Hubo una excelente correspondencia entre los datos franceses y las estimaciones del OIEA, lo que indica claramente que, de hecho, los límites superiores proporcionados por los franceses se acercaron mucho a los valores reales.

El inventario de radionucleidos se estimó a partir de las potencias haciendo algunas suposiciones razonables sobre la proporción de la energía procedente de la fisión del plutonio 239, el uranio 235, el uranio 238 y de la fusión de los isótopos de hidrógeno. En estas estimaciones también hubo una buena correspondencia con la información presentada por las autoridades francesas. (Véase el cuadro de la página siguiente.)

HIDROGEOLOGIA DE LOS ATOLONES

Las zonas volcánica y carbonatada de los atolones están saturadas de agua. En esencia, la circulación del agua subterránea en los atolones está regida por fuerzas hidrostáticas que se deben al flujo geotérmico que calienta el sistema desde abajo. Aguas oceánicas frías y más densas penetran a profundidad desde los flancos del atolón, fluyen hacia las regiones centrales más cálidas, se calientan gradualmente, se vuelven más ligeras y se mueven hacia el interior de la laguna. La gran permeabilidad dentro de las formaciones carbonatadas motiva grandes flujos centripetos de agua fría, casi horizontales.

Después de una explosión nuclear, el estado natural, previo al ensayo, de la hidrología existente en las inmediaciones

de la cavidad-chimenea se transforma debido al aumento de la permeabilidad y el calentamiento del agua y la roca. Como resultado de ello, aumenta el flujo ascendente del agua procedente de la cavidad-chimenea hacia el medio ambiente accesible.

Una vez establecido el equilibrio térmico, la temperatura de la cavidad-chimenea es de unos 25^o a 50^o C por encima de la temperatura ambiente. Este aumento de temperatura no depende, en lo esencial, de la potencia del ensayo. La temperatura de la cavidad-chimenea disminuirá lentamente al transcurrir unos cientos de años por los efectos combinados de la convección y la conducción.

En cuanto al flujo de las aguas subterráneas debajo del atolón de Mururoa, las velocidades son mayores en las inmediaciones de cada ensayo y en las rocas carbonatadas más permeables. El flujo en la roca carbonatada también se ve afectado por las fluctuaciones de la marea que mezclan, de forma eficaz, el agua en la zona carbonatada (sobre todo en los karsts) y, por tanto, influyen en la tasa de liberación de radionucleidos hacia la laguna y directamente al océano.

MIGRACION DE RADIONUCLEIDOS

Antes de que los radionucleidos puedan emigrar a través de la geosfera, deben estar presentes en la fase acuosa. Dadas las altas presiones existentes en las profundidades, los radionucleidos volátiles o gaseosos (como el tritio, los gases nobles y el yodo), inicialmente presentes en la fase gaseosa, se disolverán en el agua.

Sin embargo, la mayoría de los radionucleidos quedan atrapados en la lava o absorbidos en los escombros. Los datos obtenidos en los experimentos demuestran que la liberación de radionucleidos desde la lava y los escombros ocurre por dife-

INVENTARIO DE DETERMINADOS RADIONUCLEIDOS DE PERIODO LARGO PRESENTES EN LOS ATOLONES DE MURUROA Y FANGATAUFA

Radionucleido	Datos del Estudio(TBq)		
	Mururoa	Fangataufa	Total
Tritio	232 000	48 000	280 000
Carbono 14	25	2,6	28
Cloro 36	1,3	0,4	1,7
Calcio 41	1,0	0,3	1,3
Níquel 59	2,9	0,9	3,8
Níquel 63	340	110	450
Selenio 79	0,008	0,003	0,011
Criptón 85	670	380	1000
Estroncio 90	7300	3500	10 800
Circonio 93	0,23	0,09	0,32
Tecnecio 99	1,9	0,6	2,5
Paladio 107	0,18	0,03	0,21
Yodo 129	0,0047	0,0014	0,0061
Cesio 135	0,20	0,07	0,27
Cesio 137	10 700	4100	14 800
Europio 152	230	100	330
Neptunio 237	0,22	0,03	0,25
Plutonio 238	185	15	200
Plutonio 239	1030	70	1100
Plutonio 240	280	20	300
Plutonio 241	6200	620	6800
Americio 241	350	30	380

COMPARACION DE LAS ESTIMACIONES DE LA POTENCIA DE LOS ENSAYOS NUCLEARES SUBTERRANEOS

Lugar	Cantidad de ensayos	Energía total (equivalente de TNT expresado en kilotonnes)	
		Estimaciones del Estudio	Valores franceses
Corona de Mururoa	83	970	<1060
Laguna de Mururoa	54	1443	<1450
Corona de Fangataufa	2	39	<20
Laguna de Fangataufa	8	731	<750
Total	147	3183	<3280

rentes mecanismos. La lixiviación de la lava es un lento proceso de tasa limitada, mientras la liberación desde los escombros se supone que sea un proceso de equilibrio controlado entre las aguas subterráneas y los radionucleidos absorbidos en superficies sólidas.

En el Estudio, se empleó un modelo de porosidad doble para estimar las tasas de transporte de radionucleidos desde la cavidad de ensayo a la formación carbonatada. Se efec-

tuaron cálculos con 32 radionucleidos y se prestó especial atención a cuatro radionucleidos clave: plutonio 239, cesio 137, estroncio 90 y tritio.

Como parte del análisis, se inició un programa de muestreo independiente de las aguas subterráneas, a fin de verificar los resultados de mediciones más amplias realizadas por científicos franceses y comparar los pronósticos del equipo del Estudio con las concentraciones medidas de radionucleidos. Se tomaron

muestras del interior de la cavidad-chimenea de dos ensayos y en otros nueve lugares dentro de las formaciones carbonatadas.

Hubo una buena correspondencia entre los datos proporcionados por los franceses y los resultados del Estudio. Se comprobó que las concentraciones de plutonio o bien se aproximaban a los límites de detección o no eran detectables, incluso dentro de las cavidades-chimeneas. Se llegó a la conclusión de que el plutonio queda eficazmente retenido dentro de la lava vítrea que se forma debido a la explosión nuclear, aunque en el Estudio se mantuvo conservadoramente la hipótesis inicial de que el 5% se deposita en los escombros.

A partir de los resultados del muestreo subterráneo, se hicieron estimaciones de los inventarios de radionucleidos dentro de zonas específicas de las formaciones carbonatadas. Los radionucleidos presentes en esas formaciones pueden ser liberados a la biosfera, ya sea por el flujo subterráneo hacia el interior de las lagunas o por el flujo que se establece en las capas kársticas y hacia el océano, a unos 300 metros de profundidad.

Aunque las formaciones carbonatadas son bastante permeables, también constituyen grandes depósitos de agua y el tiempo de permanencia medio es mucho mayor que el período de semidesintegración de algunos radionucleidos como el tritio, el estroncio 90 y el cesio 137.

Se evaluaron dos modelos para describir la liberación a la biosfera: el modelo de porosidad uniforme y el modelo mixto.

En el modelo mixto, la tasa de liberación a las lagunas o el océano es proporcional al inventario en las formaciones carbonatadas. Respecto de la transferencia en la laguna, la constante de proporcionalidad puede calcularse a

partir de las estimaciones del inventario actual de tritio en las formaciones carbonatadas y las mediciones de la elevación del tritio en las lagunas, lo cual corresponde a una tasa de liberación de un 0,12 % del inventario anual. En cuanto al océano, la tasa de liberación se ha estimado que es de un 5% anual sobre la base de datos limitados relativos a la dispersión lateral del tritio en las formaciones carbonatadas.

Con el uso del modelo mixto para la liberación desde las formaciones carbonatadas y el modelo de porosidad doble para el transporte a través de las formaciones volcánicas, los inventarios en las formaciones carbonatadas y las tasas de liberación a la biosfera se estimaron para varios cientos de años en el caso del tritio, el estroncio 90 y el cesio 137, y para más de 100 000 años en el caso del plutonio 239.

La conclusión más importante derivada de estos pronósticos es que las futuras tasas de liberación del tritio, el estroncio 90 y el cesio 137 a las lagunas tienen pocas probabilidades de que sean mayores que las actuales tasas de liberación. Ya se han materializado las tasas de liberación máximas previstas a las profundidades oceánicas.

En el caso del plutonio 239, se prevé que las tasas de liberación máximas desde fuentes subterráneas ocurra, en el futuro, durante un período de 5000 a 10 000 años, pero se espera que sean inferiores a las actuales tasas de liberación en las lagunas, debido a la lixiviación de los sedimentos portadores de plutonio.

Según lo previsto a partir de los modelos descritos supra, las tasas de liberación en lagunas y océanos contribuyeron a la elaboración de modelos de dispersión marina de radionucleidos y, básicamente, a la estimación de las dosis sobre la base de la exposición a estos radionucleidos. (Véanse los artículos conexos de las páginas 34 y 38.)

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones extraídas de esta evaluación de la migración de radionucleidos desde fuentes subterráneas en los atolones de Mururoa y Fangataufa son las siguientes:

■ Las estimaciones independientes del Estudio sobre la liberación de energía y el inventario de radionucleidos procedentes de los ensayos subterráneos se correspondieron perfectamente con los valores franceses notificados.

■ Los ensayos nucleares traen como resultado un aumento de la permeabilidad de la roca que rodea el lugar donde se realice un ensayo nuclear.

■ En las rocas volcánica y carbonatada se produce un flujo natural ascendente de agua subterránea, que es más elevado en las inmediaciones de un ensayo nuclear.

■ El muestreo y análisis de las aguas subterráneas en dos cavidades-chimeneas de ensayos indica la presencia de una concentración de plutonio muy baja. La mayor parte del plutonio (>99%) queda eficazmente retenido dentro de la lava vítrea solidificada que se forma después de una explosión nuclear.

■ En las zonas carbonatadas se observan efectos de la marea que pudieran provocar cierta liberación de radionucleidos directamente en las profundidades oceánicas.

■ La mayor parte de los radionucleidos liberados a corto plazo proviene de una cantidad relativamente reducida de ensayos cuando no existe cubierta volcánica por encima de la cavidad-chimenea o cuando la cubierta es insuficiente.

■ Sólo una pequeña parte del inventario de radionucleidos escapa de la geosfera hacia el medio ambiente accesible. Las tasas de liberación más altas (en cuanto a la actividad) se deben al tritio, pero carecen de significación radiológica. Por lo general, las tasas de liberación de otros radionucleidos no son detectables en el medio ambiente, si se tienen en cuenta las grandes diluciones que se producen en las lagunas y el océano. □