

# DISPERSION DE RADIONUCLEIDOS RESIDUALES DESDE MURUROA Y FANGATAUFA HACIA EL OCEANO DESDE LOS ATOLONES HACIA LOS MARES

POR PAVEL PETER POVINEC Y EKKEHARD MITTELSTAEDT

La elaboración de modelos del transporte de radionucleidos a través del medio marino es un ejercicio complejo. Como parte del Estudio de la situación radiológica en los atolones de Mururoa y Fangataufa, los científicos investigaron la dispersión de radionucleidos tras su liberación desde las lagunas de Mururoa y Fangataufa y las fuentes subterráneas. La investigación incluyó los procesos de mezcla en las lagunas, la descarga en el océano y el transporte hacia las costas de islas vecinas y continentes distantes.

En el presente artículo se destaca la labor realizada durante el Estudio a fin de evaluar la dispersión de radionucleidos residuales en el océano y se resumen los principales resultados.

## METODOLOGIA Y ENFOQUES

A los efectos de la elaboración de modelos, la superficie en torno a la fuente de radiactividad (es decir, el punto donde los radionucleidos son liberados al medio marino) se dividió en tres zonas importantes: el campo cercano (las lagunas); el campo regional (en sentido amplio, la superficie de la Polinesia Francesa), y el campo lejano (el Pacífico Sur más allá del campo regional).

A fin de comprender la dinámica de las aguas y los sedimentos en el campo cercano, el Grupo de Trabajo sobre la elaboración de modelos marinos del Estudio de Mururoa elaboró dos modelos. Se utilizó un modelo de la mezcla del agua para estimar las concentraciones de radionucleidos en las lagunas res-

pecto de determinadas liberaciones desde fuentes subterráneas hacia las lagunas y las tasas de flujo de los radionucleidos desde las lagunas hacia el océano circundante.

Se elaboró un modelo de sedimentos para pronosticar el movimiento de sedimentos entre las lagunas y el océano. Se hicieron estimaciones de la cantidad de sedimentos, y la cantidad correspondiente de plutonio, que abandonan las lagunas anualmente en condiciones meteorológicas normales o bajo tormentas violentas.

Se evaluaron las tasas de liberación de radionucleidos desde los sedimentos de las lagunas, lo que se tradujo en estimaciones de las tasas de liberación de plutonio, cesio 137, estroncio 90 y tritio desde las lagunas hacia los océanos como función del tiempo.

Se utilizaron tres modelos compartimentados para estimar la dispersión de radionucleidos en el campo regional. Estos modelos abarcan diferentes superficies con resoluciones diferentes, y cada uno tiene determinadas ventajas y desventajas. En su conjunto, muestran la incertidumbre probable en las estimaciones de dispersión y aumentan la solidez de las conclusiones.

Se evaluaron el transporte y la dispersión en el campo lejano mediante un modelo predictivo de la circulación mundial de los océanos.

Los resultados de estos modelos constituyen estimaciones de las concentraciones de radionucleidos en el océano como función del tiempo y el lugar. Estas concentraciones se emplea-

ron a fin de estimar las dosis para la población real e hipotética en diversos lugares y momentos en el futuro.

## ELABORACION DE MODELOS DE LAS LAGUNAS

Los radionucleidos presentes en el agua de las lagunas provienen de la lixiviación del material radiactivo desde los sedimentos de las lagunas y de la migración del material desde las fuentes subterráneas. Sus concentraciones en el agua de las lagunas se determinarán mediante la tasa de liberación hacia las lagunas y el ritmo de intercambio del agua de las lagunas con el océano. Si los radionucleidos son liberados hacia la laguna, las primeras dos etapas del proceso de dispersión son la mezcla en la laguna y el intercambio del agua de las lagunas con el océano. Se elaboró un modelo hidrodinámico de circulación en las lagunas, y se calculó el tiempo medio de renovación en relación con el intercambio del agua con el océano. Se estimó que el tiempo de renovación, como promedio para todas las estaciones, era de  $98 \pm 37$  días y de  $33 \pm 12$  días en el caso de las lagunas de Mururoa y Fangataufa, respectivamente.

---

*El Sr. Povinec es Jefe de la Sección de Radiometría del Laboratorio del OIEA para el Medio Ambiente Marino en Mónaco. El Sr. Mittelstaedt, del Organismo Marítimo e Hidrográfico Federal de Alemania, fue Presidente del Grupo de Trabajo sobre elaboración de modelos marinos del Estudio de la situación radiológica en los atolones de Mururoa y Fangataufa.*

El destino final de los sedimentos no consolidados en el fondo de las lagunas (y el plutonio presente en los sedimentos) es importante para evaluar las repercusiones a largo plazo de las condiciones radiológicas en los atolones.

Se elaboró un modelo del transporte de sedimentos en el caso de la laguna de Mururoa, lo que permitió hacer una estimación preliminar de la tasa de traslado anual media de los sedimentos bentónicos mediante el paso hacia el océano de 80 000 toneladas al año. Sin embargo, una tormenta ciclónica es capaz de trasladar grandes cantidades de sedimentos desde una laguna; una tormenta semejante pudiera trasladar cerca de  $4 \times 10^6$  toneladas de sedimentos, principalmente por encima de la corona del atolón.

La tasa equivalente anual de liberación del plutonio desde esta fuente se estimó que era del orden de 0,1 TBq. Se espera que el término fuente disminuya con un período de semidesintegración real de unos diez años debido al enterramiento progresivo de los sedimentos portadores de plutonio por nuevos sedimentos.

## TASAS DE LIBERACION DE RADIONUCLEIDOS

Se consideró que el tritio, el estroncio 90, el cesio 137 y el plutonio 239 y 240 eran los cuatro radionucleidos más importantes en el ejercicio de elaboración de modelos. Los analistas tomaron en cuenta las contribuciones tanto desde la lixiviación de los sedimentos de las lagunas como desde las fuentes subterráneas,

En cuanto al tritio (con un período de semidesintegración de 12,3 años), observado en forma de agua, no hay contribuciones desde los sedimentos. Las concentraciones observadas (de unos 200 Bq/m<sup>3</sup>, un factor de

dos por encima de la concentración oceánica de fondo), se atribuyen completamente a las fuentes subterráneas. Las concentraciones de tritio en las lagunas pueden mantenerse, en cierto modo, constantes durante los próximos decenios antes de disminuir lentamente.

En cuanto al estroncio 90, se espera que la lixiviación y las fuentes subterráneas contribuyan a las concentraciones. Aunque se observó una gran dispersión en datos anteriores sobre el estroncio 90, parece que las concentraciones de radionucleidos pudieran ser superiores a los niveles actuales durante algunos decenios, aunque no en más de un factor de dos.

En el caso del cesio 137, la liberación actual desde fuentes subterráneas está, en cierta medida, relacionada con la lixiviación de los sedimentos. Sus concentraciones en las lagunas han venido disminuyendo con un período de semidesintegración aparente de unos siete años y es poco probable que sobrepasen los niveles actuales en cualquier momento en el futuro.

En cuanto al plutonio, la lixiviación de los sedimentos de las lagunas es, actualmente, la única fuente significativa. Sobre la base de las observaciones, se estima que las concentraciones de plutonio en las lagunas disminuirán con un período de semidesintegración real de unos diez años.

Atendiendo a las mediciones de estos radionucleidos en las lagunas y el océano abierto, proporcionadas por el Grupo de Trabajo sobre la elaboración de modelos marinos, se estimaron las tasas de liberación actuales desde las lagunas y se hicieron predicciones para el futuro. No se trató de considerar a Mururoa y Fangataufa fuentes independientes, ya que, a nivel oceánico, se encuentran tan cerca una de otra que no es posible distinguirlas. Las libe-

raciones a través de las lagunas se consideran liberaciones superficiales; se da por sentado que las liberaciones directas hacia el océano tengan lugar a 400 metros de profundidad.

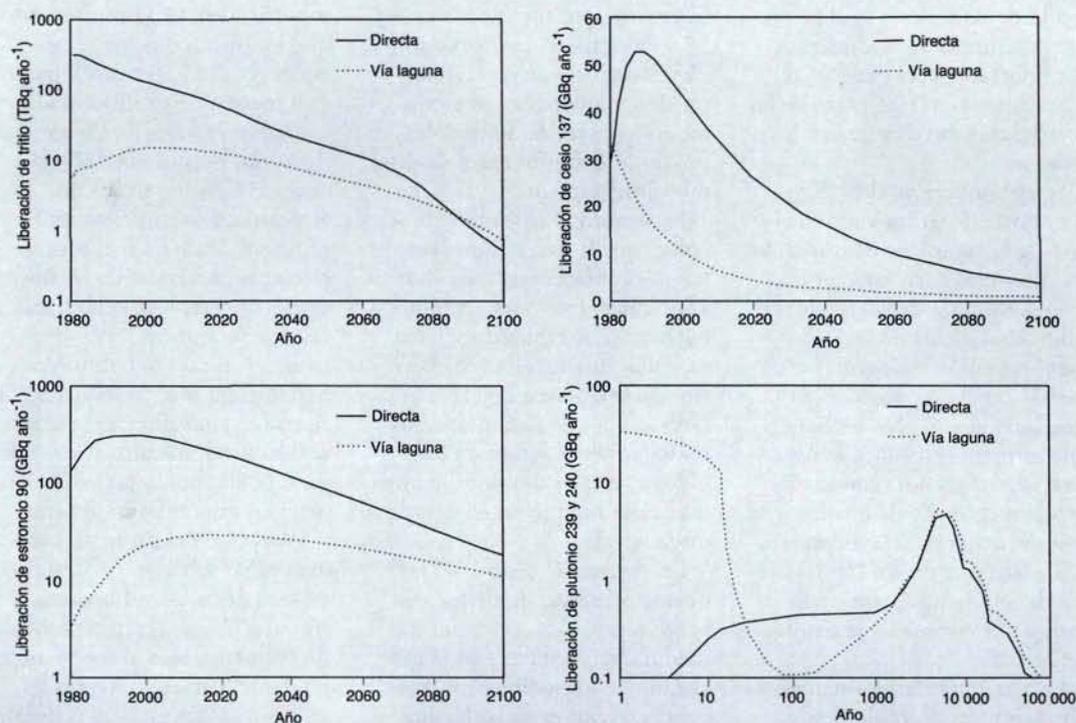
Las tasas totales de liberación del tritio, el estroncio 90 y el cesio 137 disminuirán con el tiempo, y la contribución principal desde las fuentes subterráneas provendrá de las liberaciones directas hacia el océano. (*Véanse los gráficos.*) Por otra parte, en el caso del plutonio, que migrará muy lentamente, la contribución subterránea alcanzará su nivel más alto al cabo de unos 6000 años, a un valor máximo muy inferior al actual.

En el caso del supuesto suceso disruptivo, es decir, un deslizamiento de rocas carbonatadas con una liberación instantánea de radionucleidos al medio marino desde fuentes subterráneas, las liberaciones estimadas fueron de 1 PBq para el tritio, 30 TBq para el cesio 137, 10 TBq para el estroncio 90 y 10 TBq para el plutonio 239 y 240.

## MODELOS DE DISPERSION REGIONAL

Se elaboraron tres modelos compartimentados para evaluar la dispersión de radionucleidos a nivel regional. Se incluyeron atolones cercanos como el de Tureia y muy distantes como el de Tahití, y se estudió la dispersión durante un período prolongado. Los tres modelos difieren en su resolución espacial, el grado en que se toma en cuenta la estructura vertical en el océano y el momento en que resulta conveniente seguir la dispersión. Los modelos se aplicaron a fuentes "continuas" provenientes de la migración a través de la geosfera y cuyas intensidades varían con el transcurso del tiempo, y a liberaciones "instantáneas", cuando una fracción importante de la fuente se libera en un período relativamente breve de

## TASAS DE LIBERACION DE RADIONUCLEIDOS EN MURUROA Y FANGATAUFA



Los gráficos muestran las tasas previstas de liberación -en función del tiempo- del tritio, el estroncio 90, el cesio 137 y el plutonio 239 y 240 a la biosfera.

un año, más o menos. Cabe suponer que ambos casos pudieran presentarse debido a sucesos disruptivos.

Se examinaron varios sucesos disruptivos hipotéticos, en especial sucesos extremos y sucesos debidos a cambios climáticos que pudieran provocar un aumento de las tasas de liberación del material radiactivo que se encuentra actualmente en las cavidades-chimeneas o de las tasas de exposición a los materiales presentes en el medio ambiente (por ejemplo, al plutonio presente en los sedimentos). Entre los sucesos examinados se encontraban la glaciación, que ocasiona la disminución del nivel del mar y la exposición del fondo de las lagunas, y el deslizamiento de las rocas carbonatadas, que provoca una liberación "instantánea" de los radionucleidos puestos al descubierto por dicho deslizamiento.

Se consideró que el único suceso disruptivo que merecía un examen a fondo era un desprendimiento y deslizamiento, hipotético e importante, de las formaciones carbonatadas en la zona norte del atolón de Mururoa; esta es la región donde se efectuaron las pruebas subterráneas de seguridad y algunos de los ensayos nucleares que produjeron las cavidades-chimeneas que penetran en las formaciones carbonatadas.

La elaboración de modelos compartimentados de la dispersión regional ofrece estimaciones de las concentraciones de las aguas superficiales en varias islas del Pacífico en diversos períodos respecto de las liberaciones previstas de Mururoa y Fangataufa y de las liberaciones instantáneas. Se consideró que las concentraciones previstas en los atolones de la Polinesia Francesa eran inferiores a las actuales debido a

la precipitación radiactiva global que se observa en el océano abierto.

Sólo la liberación de plutonio a causa de un suceso disruptivo (un deslizamiento de rocas) provoca un nivel de concentración más elevado (de casi dos órdenes de magnitud) en el atolón más cercano (Tureia) que los actuales, debido a la precipitación radiactiva global. Sin embargo, al cabo de diez años, las concentraciones previstas estarán por debajo de las actuales concentraciones de fondo.

### ELABORACION DE MODELOS DE CAMPO LEJANO

Se utilizó un modelo de la circulación general de campo lejano para estimar las concentraciones oceánicas de los radionucleidos liberados desde los atolones y que son transpor-

tados a lugares tan distantes como la costa oriental de Australia y la costa occidental de América del Sur y dispersados en ellos. El modelo se aplicó a fuentes continuas e instantáneas y a casos en que la liberación ocurre en la capa superficial y a 400 metros de profundidad, por debajo del termoclino.

En este último caso, el material liberado queda atrapado debajo del termoclino y se inhibe la dispersión; las concentraciones más elevadas se encontrarán a una mayor distancia de los puntos de liberación, pero a unos 400 metros de profundidad.

Sólo en el caso de un suceso disruptivo hipotético —un deslizamiento de rocas, con una liberación a 400 metros de profundidad— las concentraciones, a nivel del mar, el estroncio 90 y el cesio 137 en el atolón de Tureia pudieran alcanzar los niveles actuales observados en el sur del Océano Pacífico debido a la precipitación radiactiva global.

Por ejemplo, en cuanto al tritio, el aumento máximo previsto de la concentración es de unos  $10 \text{ Bq/m}^3$  al cabo de cinco años a mitad del camino hacia Australia y de cerca de  $1 \text{ Bq/m}^3$  frente a las costas de Australia, cinco años después. Estos pueden compararse con el nivel de fondo del tritio de 50 a  $100 \text{ Bq/m}^3$  a 400 metros de profundidad. La liberación de plutonio traería como resultado una concentración oceánica prevista en el atolón de Tureia de  $100 \text{ mBq/m}^3$ . Esta es de casi dos órdenes de magnitud más elevada que la actual concentración oceánica muy baja existente en el lugar (de casi  $1 \text{ Bq/m}^3$ ) debido a la precipitación radiactiva global asociada a todos los ensayos nucleares atmosféricos. Las concentraciones oceánicas del plutonio en Tureia disminuirán al nivel de las concentraciones de fondo dentro de diez años.

En el caso de una liberación de radionucleidos en función del tiempo y más realista, las concentraciones previstas de radionucleidos a largo plazo estarán por debajo de los niveles oceánicos de fondo a más de 100 kilómetros de los atolones de Mururoa y Fangataufa.

Por ejemplo, en el caso del plutonio, de producirse una liberación superficial, las concentraciones máximas previstas en la superficie, después de diez años de liberación, serían de unos  $0,2 \text{ mBq/m}^3$  en las cercanías de Mururoa. Estas son aproximadamente de un orden de magnitud inferior a los niveles actuales.

## CONCLUSIONES GENERALES

En resumen, el Grupo de Trabajo sobre la elaboración de modelos marinos del Estudio llegó a las siguientes conclusiones:

■ El tiempo estimado de traslado del agua de las lagunas es de  $98 \pm 37$  días para Mururoa y de  $33 \pm 12$  días para Fangataufa.

■ Se estima que la transferencia de partículas de plutonio 239 y 240 (combinado con los sedimentos) desde la laguna de Mururoa hacia el Océano Pacífico sea de  $8 \text{ GBq}$  al año, con vientos y mareas medios, y de  $0,7 \text{ TBq}$  en caso de una tormenta violenta (por tormenta). Se estima que la frecuencia de una tormenta violenta sea de una cada diez años. Se espera que el término fuente, provocado por las tormentas disminuya con el tiempo debido al agotamiento de los sedimentos portadores de plutonio y al gradual enterramiento de estos sedimentos. El término fuente debido al plutonio de una tormenta es de un orden de magnitud inferior al que libera un suceso disruptivo hipotético.

■ Se elaboraron modelos de dos importantes escenarios de liberación: 1) un suceso disruptivo, deslizamiento de rocas

carbonatadas, que genera actividad desde la zona carbonatada que corresponde al inventario de una prueba de seguridad y un ensayo en la cavidad-chimenea, y 2) una fuente, en función del tiempo, proveniente de la migración de materiales desde las cavidades subterráneas y la lixiviación de sedimentos en la laguna.

La mayoría de las simulaciones han supuesto la liberación a las capas superficiales. Sin embargo, en algunos cálculos se dio por sentado que la fuente estaría localizada en las profundidades (a 400 metros) y que la liberación se simularía desde las capas kársticas.

A los efectos de estos escenarios, se estimó el aumento máximo de las concentraciones en las lagunas y en las islas y atolones del Pacífico Sur. Las concentraciones previstas en el atolón habitado más cercano (Tureia) se compararon con las concentraciones de fondo en el océano abierto, debidas a la precipitación radiactiva global. Sólo la liberación de plutonio en caso de un suceso disruptivo provocaría concentraciones más elevadas que el nivel de fondo y, por ende, sólo durante algunos años.

En cuanto a las liberaciones en las profundidades, se prevé que las concentraciones en Hao y Tahití sean más elevadas que en Tureia. Sin embargo, al promediarse los datos correspondientes a estos lugares en relación con una profundidad total de 450 metros, todas están por debajo de los valores máximos.

En general, la elaboración de modelos de la dispersión de radionucleidos desde los atolones de Mururoa y Fangataufa hacia el océano abierto arrojó claros resultados. El ejercicio ha demostrado que las concentraciones previstas en las islas habitadas cercanas no serían suficientemente elevadas como para que tengan algún interés radiológico. □