

## INVESTIGANDO PRECIPITACIONES DEBIDAS A ENSAYOS NUCLEARES

# PARTICULAS CALIENTES Y GUERRA FRIA

POR PIER ROBERTO DANESI

**E**n los inicios del próximo siglo, se habrán registrado más de 2000 explosiones de ensayos nucleares de diversas magnitudes y tipos. Casi todas se realizaron durante el período de la guerra fría, concluida en los años noventa.

Los ensayos nucleares atmosféricos dispersaron residuos radiactivos al medio ambiente, que se han distribuido entre el territorio local (o el agua superficial) y las regiones troposférica y estratosférica, según el tipo de ensayo, lugar y potencia. La posterior precipitación que transporta los residuos, ocasiona la precipitación radiactiva local y mundial. Las concentraciones de determinados radionucleidos pueden provocar la formación de “partículas calientes”, diminutos fragmentos de materiales que contienen elementos químicos radiactivos.

La precipitación radiactiva local incluye grandes aerosoles radiactivos, partículas que generalmente se depositan en un perímetro de unos 100 kilómetros del polígono de ensayos. Además, la contaminación radiactiva local en los polígonos de ensayo de armas nucleares se atribuye a las pruebas de seguridad de los dispositivos nucleares que con frecuencia dispersan material fisionable. La liberación de este material ocurre de diversas formas: el vapor de plutonio, los aerosoles de plutonio de distintos tamaños, las partículas de óxido de plutonio, las partículas revestidas de plutonio y grandes pedazos de material de construcción contaminado con

plutonio, destruido por la explosión experimental.

La precipitación radiactiva mundial abarca tanto la precipitación troposférica como la estratosférica. La primera consiste en aerosoles que no son transportados a través de la tropopausa y que se depositan con un tiempo de residencia medio de hasta 30 días. Durante ese tiempo, los residuos se dispersan en la banda de latitud de inyección, y siguen las trayectorias regidas por los patrones de los vientos. La precipitación estratosférica resulta de las partículas que más tarde dan lugar a la precipitación radiactiva mundial generalizada, la mayor parte de la cual ocurre en el hemisferio donde se realizó el ensayo nuclear. A ella se debe la mayoría de los residuos de los productos de fisión de período largo.

La precipitación nuclear provoca la exposición de las personas a la radiactividad mediante la irradiación interna (debida a la inhalación de materiales radiactivos presentes en el aire o la ingestión de alimentos contaminados), y la irradiación externa (debida a materiales radiactivos presentes en el aire superficial o depositados en el suelo). Se han realizado amplios estudios en estas esferas.

En el caso de los ensayos nucleares, las evaluaciones del

*Fotos: Marcador en el antiguo polígono de ensayos nucleares de Maralinga, Australia meridional. En el polígono de ensayos de Mururoa, Polinesia Francesa, un grupo del OIEA recogió muestras de suelo para analizar partículas calientes. (Cortesía: Danesi/OIEA)*



carácter del suceso primario suelen incluir los análisis del material radiactivo depositado en el suelo. No obstante, esos estudios son problemáticos, porque pueden haber alteraciones significativas de la composición de los radionucleidos entre el momento de una detonación nuclear y de la recogida de muestras para análisis radioquímico. Un proceso llamado fraccionamiento hace que las muestras de residuos radiactivos no sean representativas de los productos de la detonación.

El fraccionamiento comienza con la condensación del material radiactivo e inerte, procedente de la bola de fuego. La mezcla puede comenzar a separarse mientras se esté produciendo la condensación por influencia del viento, la gravedad y la turbulencia de la nube radiactiva. La separación del condensado continúa mediante diversos procesos, como el con-

*El Sr. Danesi es Director de los Laboratorios del OIEA en Seibersdorf, situados cerca de la sede del Organismo en Viena, Austria.*

tacto de los residuos con el material inerte.

Cuando se forma la nube radiactiva, los procesos de enfriamiento, condensación, coagulación, mezcla y separación ocurren simultáneamente, pero en diferentes grados y en distintas regiones de la nube. Además, los productos radiactivos iniciales cambian en forma elemental debido a los procesos de desintegración radiactiva.

**Partículas calientes.** El conocimiento científico de los fenómenos del fraccionamiento es importante para interpretar la precipitación radiactiva mundial y la química nuclear del proceso de detonación. También es útil para evaluar la contaminación y los riesgos de ingestión.

Según las pautas de fraccionamiento, las variaciones en el tamaño y el tipo de partículas están acompañadas de variaciones en la composición radioquímica. Las características y las concentraciones de radionucleidos, junto con el tamaño y la forma de las partículas, son, a su vez, los factores que determinan la inhalación o el peligro de ingestión.

Otra información científica importante es la referida a la forma química en que los radionucleidos están presentes en las partículas. En general, los radionucleidos presentes en las partículas calientes son relativamente inertes en comparación con los iones, átomos y los compuestos de masa molecular baja que son más móviles y más comunes.

Para evaluar las consecuencias a corto y largo plazo de la precipitación atmosférica —y, en particular, la fuga de radionucleidos de las partículas calientes— es esencial disponer de información fisicoquímica detallada sobre este término fuente. Por lo general, las características de los términos fuente se han limitado a las

estimaciones de los inventarios, los niveles de actividad o las concentraciones de actividad de los radionucleidos depositados. La información sobre la forma fisicoquímica es escasa.

Después de la deposición, las partículas están sujetas a la meteorización y los radionucleidos asociados se movilizan con el tiempo. La composición de las partículas, los posibles cambios estructurales y las condiciones químicas en el lugar de la deposición influirán en la tasa de meteorización. Además, los radionucleidos que se movilizan también pueden interactuar con el suelo y los sedimentos.

La mayoría de los modelos de evaluación de la transferencia y las consecuencias de la contaminación de radionucleidos suponen que éstos están presentes como compuestos iónicos o de bajo peso molecular, lo que puede llevar fácilmente a la exageración de las consecuencias a corto plazo de la contaminación radiológica.

Por otra parte, si las partículas son más bien inertes, como suele suceder, la transferencia de radionucleidos se demorará hasta que ocurra la meteorización. Por consiguiente, se puede subestimar la evaluación de las consecuencias a largo plazo de la contaminación radiológica.

Por tanto, es evidente que si no se tiene en cuenta la función de las partículas calientes, las predicciones establecidas con ayuda de modelos pueden presentar considerables incertidumbres.

La presencia de partículas calientes también puede invalidar algunas hipótesis, hechas al tratar la cuestión de la contaminación del suelo y de los sedimentos. Ello incluye la hipótesis frecuente de que la conversión de las concentraciones de actividad superficial o por unidad de masa en unida-

des de diversas magnitudes (por ejemplo, de Bq/cm<sup>2</sup> a Bq/m<sup>2</sup> o Bq/km<sup>2</sup> y viceversa) es un ejercicio legítimo.

Los siguientes ejemplos ilustran enfoques específicos en relación con el estudio de las partículas calientes en los polígonos de ensayo de armas nucleares.

## ESTUDIOS EN AUSTRALIA MERIDIONAL

Desde 1953 hasta 1963, el Reino Unido ejecutó un programa de ensayos de armas nucleares en Maralinga y Emu, en Australia meridional. En estos polígonos, ahora totalmente rehabilitados, se realizaron nueve explosiones nucleares y varios centenares de pruebas de menor escala.

Aunque las grandes explosiones tuvieron una potencia entre uno y 27 kilotones, en las pruebas de menor envergadura sólo hubo "quemado" y dispersión explosiva de uranio, plutonio y radionucleidos de período corto. Las consecuencias ambientales de estas pruebas fueron ampliamente estudiadas por el Laboratorio Radiológico Australiano (ARL) y han sido el tema de una serie de publicaciones.

La contaminación con plutonio más significativa, en Maralinga, se debió a una serie de doce pruebas de seguridad en las que se liberaron al medio ambiente 22 kg de plutonio (y una cantidad similar de uranio 235). El material fue dispersado por explosivos convencionales y ocurrieron pocas o ninguna reacción nuclear. El plutonio fue expelido verticalmente hasta alturas de 800 metros y fue dispersado por los vientos dominantes a considerables distancias. Ello provocó la contaminación de grandes extensiones de tierra. Se pudo encontrar plutonio a muchos kilómetros de distancia de los puntos de detonación.



El ARL identificó plutonio, principalmente, en tres formas: en forma de capas superficiales sobre materiales como fragmentos de metales, plásticos, alambres y ladrillos de plomo que formaban parte de los conjuntos experimentales; en forma de diminutos fragmentos o partículas, no siempre visibles para el ojo humano, pero que pueden detectarse fácilmente con un monitor gamma; y en forma de material muy finamente disperso compuesto por partículas de suelo contaminado y partículas de plutonio recondensado en la misma gama de tamaños que el propio suelo.

Se recogieron y cribaron muestras de este material, separándolas hasta un diámetro de 45 micrómetros para determinar las concentraciones de masa y actividad. Los resultados arrojaron que la masa más voluminosa estaba generalmente relacionada con la fracción de 250 a 500 micrómetros; sin embargo, la mayor parte de la actividad (un 41%) estaba concentrada en la fracción inferior a 45 micrómetros, que contenía sólo el 5% de la masa total.

La parte menor fue también fraccionada en siete tamaños aerodinámicos que fluctuaron entre 45 micrómetros y menos de tres micrómetros. De esta forma, también se determinó la fracción que se puede inhalar, la de un tamaño inferior a los siete micrómetros.

También se determinaron partículas en una muestra de 800 gramos de suelo (que tenía una actividad de 25 Bq de americio 241), fragmentada por un proceso de separaciones binarias en partículas discretas. Se determinó que toda la actividad de la muestra estaba contenida en las 54 partículas calientes separadas. Se calculó que la actividad de cada partícula estaba dentro de la gama de 0,1 a 2,0 Bq de americio 241 y el diámetro medio era de unos 20 micrómetros.

El estudio también identificó un gran número de partículas calientes submilimétricas que se analizaron mediante espectrometría gamma de alta resolución (para determinar la relación entre el plutonio 239 y el americio 241) y la absorción biológica. También se analizaron cinco partículas submilimétricas con actividades que oscilaban entre 30 Bq y 5 kBq mediante espectroscopía de emisión de rayos X inducidos por protones, para obtener información sobre composición elemental y homogeneidad de estas partículas.

En estas partículas, de varios cientos de micrones de diámetro, se encontró plutonio y uranio distribuidos de manera homogénea sobre la superficie. Los principales elementos identificados fueron aluminio (1,8%), potasio (2,3%), calcio (1%), hierro (23%), plomo (de 1,9% a 35%), uranio (2,9% a 0,8%) y plutonio (19%). Los estudios de disolución en líquido pulmonar simulado indicaron que las partículas no tenían una alta solubilidad.

### ESTUDIOS EN LA POLINESIA FRANCESA

Un grupo de expertos realizó otras investigaciones sobre las partículas calientes en la Polinesia Francesa, como parte del Estudio internacional de la situación radiológica en los atolones de Mururoa y Fangataufa, que concluyó en 1998. Desde julio de 1966 a septiembre de 1974, se realizaron 41 ensayos nucleares atmosféricos en esos lugares. Además, se llevaron a cabo cinco pruebas de seguridad sobre la superficie, en el extremo septentrional del atolón de Mururoa, en las zonas generalmente denominadas como la región de Colette.

Las pruebas de seguridad se efectuaron con el objetivo de investigar el comportamiento

del núcleo de dispositivos nucleares en condiciones de detonación defectuosa simulada. El núcleo fue destruido por una detonación de un explosivo convencional, con la consiguiente dispersión durante cada ensayo de unos 3,5 kg de plutonio 239 en forma de plutonio finamente dividido y óxido de plutonio. Aunque se llevaron a cabo amplias operaciones de descontaminación entre 1982 y 1987, quedaron partículas calientes de plutonio en la superficie de la región de Colette y en el banco de arena, adyacentes a la laguna.

Como parte del Estudio internacional, un grupo de científicos evaluó la contaminación residual en el ambiente terrestre de Mururoa y Fangataufa, incluida la región de Colette. Los Laboratorios del OIEA en Seibersdorf, organizaron y coordinaron una campaña de muestreo que llevaron a cabo en el verano de 1996. A ella siguieron amplias mediciones radioquímicas en unas 300 muestras. (Véase el artículo de la página 24.)

El análisis de la contaminación residual en la región de Colette determinó la presencia de partículas calientes que contenían plutonio. Se separaron de los escombros coralinos y las rocas coralinas trituradas, veinte partículas relativamente grandes, cuyo tamaño oscilaba entre 200 micrómetros y un milímetro; se midieron mediante espectrometría gamma de alta resolución para evaluar la actividad de estas partículas y la relación del plutonio 239 respecto del americio 241. Se observó que la actividad del plutonio 239 se encontraba entre los 5 y los 300 kBq, aunque también se halló una partícula con un nivel de alrededor de 1 MBq. La actividad del americio 241 en las partículas osciló entre 0,2 y 5,6 kBq. También se estudiaron seis de estas partículas calientes, con diámetros entre los

200 y los 500 micrómetros, mediante microscopía óptica y microfluorescencia X. Las observaciones revelaron que algunas partículas eran de naturaleza compacta, vidriosa y lisa, mientras otras eran rugosas y hasta podían ser conglomerados de partículas más pequeñas.

Además del plutonio, se determinó que las partículas contenían otros elementos; uranio y neptunio en concentraciones de 10 a 100 veces menores que el plutonio; calcio (que indicó que tenían una matriz de carbonato de calcio); hierro (que indicó su naturaleza metálica); cloro (con toda probabilidad, de la sal marina); y trazas de manganeso, níquel, cromo, cobalto y titanio (las cuales probablemente reflejen la composición de los contenedores de acero del material fisiónable utilizado en las pruebas de seguridad).

Para calcular la distribución del plutonio en los escombros coralinos, también se cribó una muestra de 1053 gramos en fracciones de siete tamaños. Se midió la actividad del plutonio y del americio en las diversas fracciones mediante espectrometría gamma de alta resolución. Los resultados mostraron que el 99,9% de la masa y el 95,8% de la actividad estaban presentes en partículas mayores de 250 micrómetros.

De todas formas, debe señalarse que el estudio no excluyó la presencia de partículas menores de 10 micrómetros (que contenían la fracción que se puede inhalar) con actividades de plutonio 239 de varios cientos de bequerelios. Los estudios de disolución *in vitro* en simulante sérico de seis partículas calientes mostró que la cantidad de plutonio solubilizado era, en todos los casos, inferior a 0,07% de la inicialmente presente en las partículas, lo que indicó que las características de disolución eran similares a las de las partículas del polígono de ensayos nucleares de Maralinga.

## NECESIDADES FUTURAS

La investigación de las partículas calientes es muy pertinente para corregir evaluaciones de los riesgos radiológicos en los lugares que fueron contaminados por los ensayos de armas nucleares. No obstante, hasta ahora, los estudios han originado más interrogantes que respuestas definitivas. Indican que la información sobre las partículas calientes y el fraccionamiento de partículas, obtenidas mediante análisis radioquímico, químico y físico de los escombros es todavía demasiado poca y está demasiado dispersa cuando se examina en relación con la diversidad de partículas producidas y el número de variables que requieren investigación. Por tanto, todavía no se conocen cabalmente los complejos fenómenos que rigen la formación, la composición química y radioquímica, y las propiedades físicas y morfológicas de las partículas calientes y su comportamiento en el medio ambiente natural.

No cabe duda de que son complejos los fenómenos que llevan a la formación de las partículas calientes y su comportamiento en los ecosistemas. Por eso, cualquier generalización debe exponerse con cautela. Se cree que para hacer nuevos progresos en esta esfera se requerirán grupos multidisciplinarios de científicos, como por ejemplo, fisicoquímicos, especialistas en técnicas microanalíticas no destructivas, radioquímicos, físicos nucleares y físicos sanitarios.

También cabe señalar que las partículas calientes de varios tamaños y composición, que contienen actínidos y productos de fisión o activación, son liberadas al medio ambiente desde otras fuentes, además de los ensayos nucleares. Por ejemplo, se produjeron partículas calientes en el incendio del reactor de Windscale, en 1957, el choque

del avión B-52, en Tule, en 1968, el choque del satélite Cosmos, en Canadá, en 1978, y el accidente de Chernobil, en 1986. Las partículas calientes también han sido liberadas al medio ambiente en instalaciones nucleares que contribuyen a la producción de material fisiónable para los programas de armas nucleares.

En general, se sabe que toda instalación de tratamiento de materiales nucleares libera al medio ambiente inmediato cantidades pequeñas, pero perceptibles, de isótopos radiactivos y no radiactivos. Estas emisiones, que a menudo son insignificantes desde el punto de vista del riesgo radiológico, pueden producirse en forma de corrientes de desechos, aerosoles o partículas, y pueden hallarse a cierta distancia del punto de liberación, a favor del viento o aguas abajo.

Para estudiar otras fuentes de radiactividad ambiental, pueden aplicarse las mismas técnicas analíticas modernas que se utilizan para investigar las partículas calientes producidas por los ensayos nucleares. Estas técnicas permiten a los científicos medir cantidades extremadamente pequeñas de elementos químicos e isótopos, presentes en los materiales radiactivos liberados, proporcionando así información sobre el proceso que las forma.

Cabe esperar que en los años futuros se realicen más estudios sobre partículas calientes en los lugares que han sido contaminados por los ensayos de armas nucleares y diversos tipos de accidentes nucleares, y en los lugares cercanos a las instalaciones nucleares. Los trabajos se beneficiarán de los adelantos que se logren en las técnicas analíticas instrumentales. Además, propiciarán un mayor conocimiento del papel que desempeñan las partículas calientes al evaluar los riesgos radiológicos, y al obtener información sobre el tipo y el propósito de las instalaciones que las generaron. □