



Pruebas nucleares atmosféricas (1945-1980) y diseminación de radiactividad artificial en el medioambiente

La Segunda Guerra Mundial finalizó prácticamente con el lanzamiento de dos bombas nucleares a las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki. Inmediatamente después comenzó una enorme escalada en la realización de pruebas nucleares atmosféricas por las grandes potencias, cada vez de mayor energía, con la consecuente liberación de radiactividad al medio ambiente, con el fin de liderar la denominada carrera armamentística nuclear. El número de pruebas y la energía liberada en ellas llegó a ser tan elevado que las principales potencias mundiales acordaron

en 1962 una moratoria que impidiera este tipo de pruebas. Estados Unidos, la antigua Unión Soviética y Gran Bretaña cumplieron esa moratoria mientras que países como Francia y China siguieron realizando pruebas nucleares atmosféricas hasta los 80, aunque con una liberación de energía muy inferior a las alcanzadas a en los 50 y principios de los 60 por EE.UU. y la U.R.S.S.

■ Texto: **Rafael García-Tenorio** | Centro Nacional de Aceleradores (U. Sevilla, Junta de Andalucía, CSIC) y Departamento de Física Aplicada II, Universidad de Sevilla ■

Desde 1945 hasta 1980 más de 500 pruebas nucleares atmosféricas fueron realizadas en un número limitado de localizaciones repartidas en el

planeta, cubriendo estas pruebas un rango de energía tan elevado como el que va desde decenas de kt hasta liberaciones de varias decenas de Mt.*

Cinco países realizaron estas pruebas en un total de 16 localizaciones principales. El número de pruebas en cada localización fue muy variable, así como la energía total

liberada de sus explosiones. En la Figura 1 se muestran las mencionadas localizaciones, asignando a cada una de ellas un círculo cuya superficie es proporcional a la energía liberada en las pruebas realizadas en ese punto. Atendiendo a la energía total liberada en el conjunto de pruebas nucleares atmosféricas, más del 90 % corresponde a pruebas nucleares realizadas por la Unión Soviética en Novaya Zemlya y por los Estados Unidos en las islas Marshall. En Novaya Zemlya en particular, se realizó a principios de los 60, la prueba nuclear con mayor liberación de energía de todas las realizadas, la denominada prueba Zar, con una liberación de energía de más de 50 Mt.

Cada explosión nuclear se caracteriza por producir una diseminación de radiactividad a nivel local (< 300 km), regional y/o global dependiendo su distribución entre estos tres compartimentos de factores como la altura a la que se realiza la explosión y la energía liberada en cada explosión. Se han realizado pruebas superficiales, pruebas a decenas de metros en torres, y a mucha más altura con la ayuda de globos o/y otros sistemas de vuelo.

Los Estados Unidos y la Unión Soviética realizaron numerosas pruebas nucleares con baja liberación de energía y numerosos *safety tests* (pruebas para comprobar el comportamiento de estas bombas en accidentes como incendios, caídas desde una elevada altura, etc.) con nula o pequeña liberación de energía. Estas

* Nota: La liberación de energía en estas pruebas se mide mediante una unidad algo atípica. El método de cuantificación de la energía liberada en explosiones nucleares, se basa en la equivalente cantidad de energía liberada en la detonación de trinitrotolueno (TNT): Un ton (t) corresponde a la energía liberada en la explosión de una tonelada de TNT, utilizándose generalmente los múltiplos kilotón (kt) y megatón (Mt).

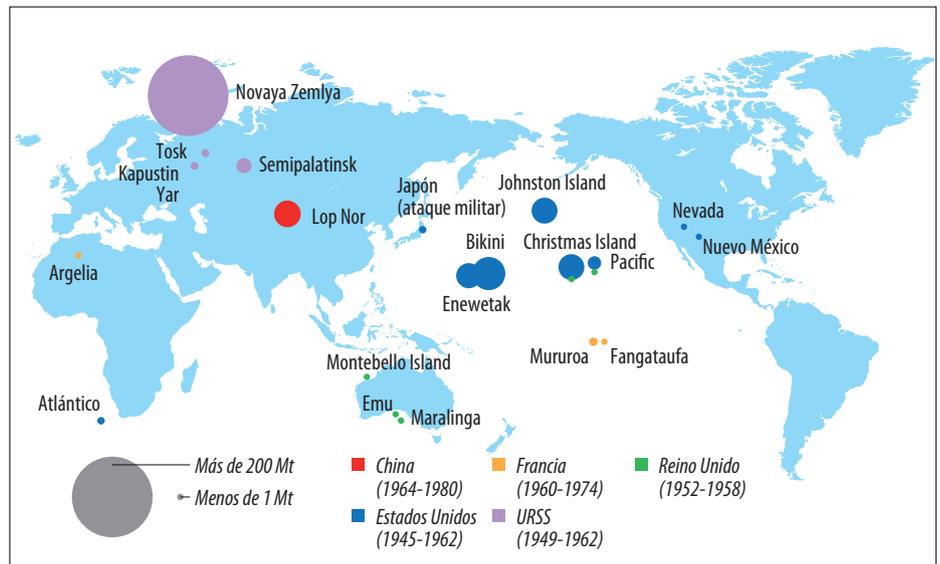


Figura 1.- Localización de las áreas donde se realizaron pruebas nucleares atmosféricas. Fuente: UNSCEAR.

pruebas las realizaron fundamentalmente en dos áreas del planeta; en Nevada (EE.UU.) y en Semipalatinsk (U.R.S.S.). En Nevada se realizaron un total de 88 pruebas nucleares atmosféricas, con una energía total liberada de un megatón. Ello produjo una contaminación radiactiva local y también, en menor medida, regional, atendiendo a las direcciones predominantes del viento. Estas pruebas fueron realizadas a poca altura y la liberación de energía en cada prueba fue tan limitada que debido a esas pruebas sólo una fracción ínfima de la contaminación radiactiva penetró en la estratosfera.

En Semipalatinsk (Kazajistán) se realizaron desde 1949 hasta 1962 un total de 116 explosiones nucleares atmosféricas, con una energía liberada total de 6.6 Mt, realizadas a baja altura o incluso sobre la superficie. De forma análoga a Nevada, en Semipalatinsk dominó la diseminación local y regional de la contaminación radiactiva generada por las explosiones, con una contaminación mínima a una contribución global, al no alcanzar la contaminación generada una altura suficiente para entrar en la estratosfera.

Estados Unidos realizó las pruebas nucleares con una mayor liberación de energía en los atolones de Bikini y Ene-

wetak (islas Marshall) en el Pacífico (hemisferio norte). Estas pruebas se realizaron desde 1946 hasta 1958 con una energía total liberada de 109 Mt, con 77 Mt en la isla de Bikini y 32 Mt en la isla Enewetak. Obviamente, la población de estas islas fue trasladada, durante los años de las pruebas, a otras islas del Pacífico. Las pruebas realizadas en estas islas produjeron una elevada contaminación local y regional (afectando al Pacífico) y contribuyeron considerablemente a la entrada de cantidades apreciables de radiactividad en la estratosfera, pues las pruebas fueron realizadas bien a suficiente altura (utilizándose torres o globos) o con una energía liberada tan elevada que los hongos radiactivos creados entraron en contacto con las capas bajas de la estratosfera.

El lugar en que los soviéticos realizaron sus pruebas nucleares con una mayor liberación de energía se corresponde con Novaya Zemlya, situada en la esquina noreste de Europa, en una zona ártica prácticamente despoblada. En esta región se realizaron pruebas nucleares atmosféricas desde 1955 hasta 1962. A ellas corresponde más de la mitad de la energía liberada en todo el planeta por pruebas nucleares. Estas explosiones se realizaron a gran altura (varios miles de metros),

lo que implicó que la mayor parte de la contaminación radiactiva generada se acumulara en la estratosfera, mientras que la contaminación local y regional fue mínima. De hecho, en las principales ciudades del norte de Europa no se detectaron eventos de contaminación asociados a estas pruebas. A que la gran mayoría de la contaminación se acumulase en las capas bajas de la estratosfera contribuyó notablemente el hecho bien conocido de que la estratosfera se encuentra a alturas claramente inferiores en las zonas polares del planeta a las zonas ecuatoriales.

Podemos concluir pues indicando que mientras las pruebas nucleares de EE. UU. en las Islas Marshall han producido contaminación local, regional y global, las pruebas nucleares soviéticas en Novaya Zelmya han producido fundamentalmente contaminación global. Esta conclusión es muy relevante para poder explicar la distribución de la contaminación remanente en el planeta por la realización de estas pruebas nucleares atmosféricas.

La contaminación a nivel local o regional experimenta una deposición rápida (fundamentalmente gravitacional) en tiempos máximos de días o semanas, observándose claramente como esa contaminación se distribuye en la dirección de los vientos predominantes, con un gradiente descendiente con la distancia al punto de la explosión.

La deposición de la contaminación contenida en la estratosfera sigue un proceso mucho más complejo. En primer lugar, esta contaminación se homogeneiza a lo largo de todo el hemisferio, para, posteriormente, mediante intercambios parciales estratosfera-troposfera, ir incorporándose a esta última a lo largo del tiempo a un ritmo de intercambio de aire constante a una determinada latitud, pero con un intercambio máximo a latitudes medias y mínimo en el ecuador y en el polo. Es de destacar, por otra

parte, que el intercambio entre masas de aire estratosférico entre hemisferios es mínimo, por lo que si se tiene en cuenta que la mayoría de las pruebas nucleares se realizaron en el hemisferio norte (ver Figura 1), podemos concluir que:

a) La deposición global en el hemisferio norte ha sido claramente superior a la deposición total en el hemisferio sur.

b) En cada hemisferio la deposición será mayor en las latitudes medias, disminuyendo hacia latitudes extremas.

Debido a la deposición global, a una latitud determinada se obtendrán unos perfiles de contaminación en función del tiempo muy similares en diversos puntos, pues el intercambio estratosfera-troposfera serán muy

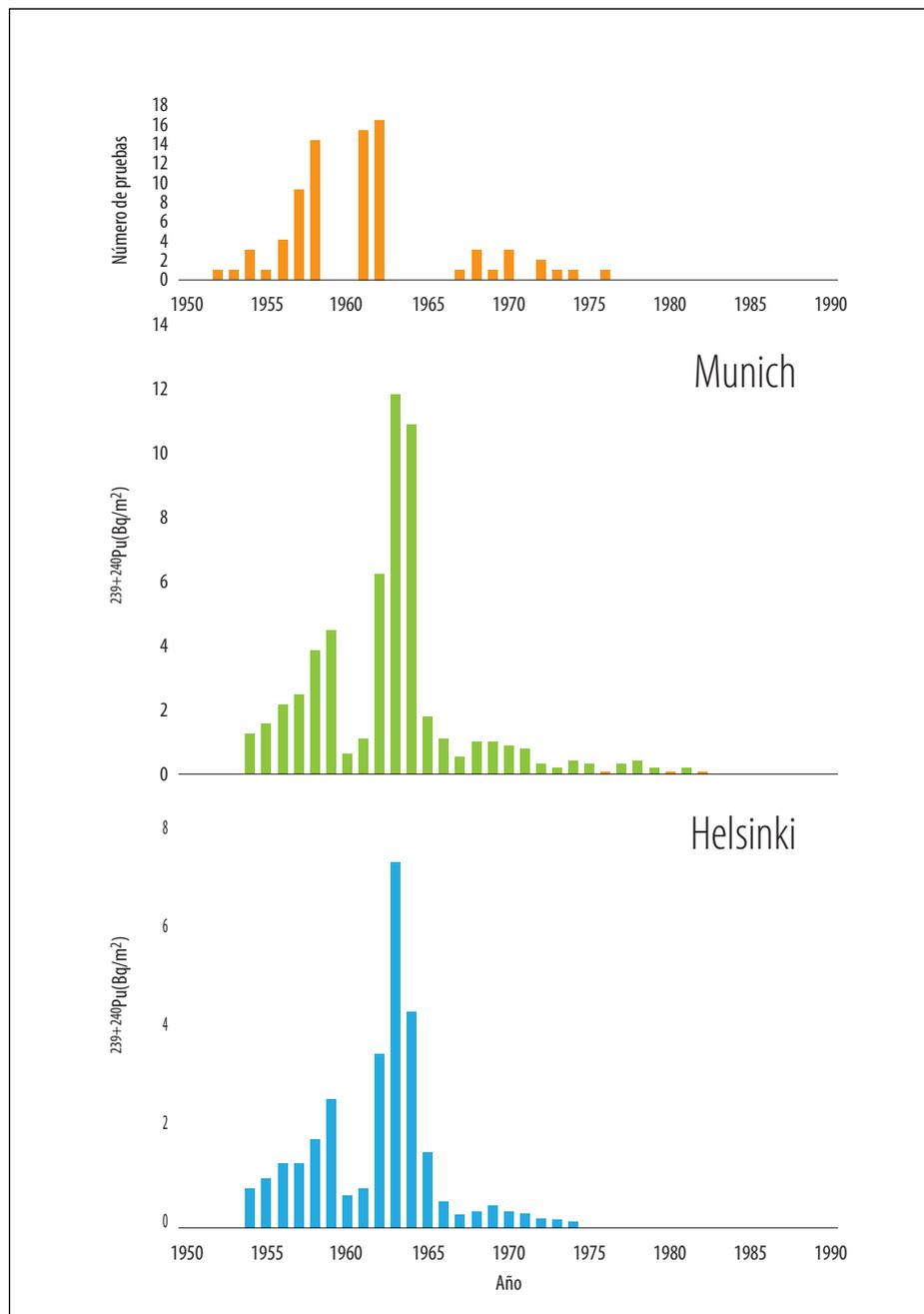


Figura 2. Perfiles temporales de concentraciones de actividad detectados en la atmósfera de Múnich y Helsinki, debido a las pruebas nucleares atmosféricas.

similares y la contaminación en la estratosfera está homogeneizada. Estos perfiles mostrarán indirectamente la evolución temporal que la contaminación radiactiva acumulada en la estratosfera ha ido experimentando desde el comienzo de las pruebas nucleares. En la Figura 2 se muestran los perfiles temporales de concentraciones de $^{239+240}\text{Pu}$ en dos ciudades del hemisferio norte situadas en latitudes no extremas y no sometidas a contaminaciones locales o regionales por pruebas nucleares en su entorno. Se observa la similitud de los perfiles al tener una fuente prácticamente idéntica (fracción que pasa anualmente desde la estratosfera a la troposfera) y como esos perfiles reflejan de una forma clara la evolución de las pruebas nucleares en el hemisferio norte, con cierto retraso por la incorporación retardada a la troposfera de la contaminación que se va acumulando en la estratosfera.

Perfiles similares a los anteriores pueden encontrarse en las zonas árticas y ecuatoriales del hemisferio norte, pero con una deposición integral inferior, y también se observan perfiles similares en el hemisferio sur, con deposiciones integradas claramente inferiores a las observadas a la misma latitud en el hemisferio norte, pues el número de pruebas nucleares y la actividad liberada total en el hemisferio sur es inferior a las del hemisferio norte y los intercambios de masas de aire entre hemisferios se encuentran muy limitados.

En la península ibérica, los perfiles de contaminación radiactiva serán similares a los obtenidos en Munich, obteniéndose perfiles de ese tipo no sólo para $^{239+240}\text{Pu}$ sino también para productos de fisión con alta producción y suficiente periodo de semidesintegración para no haber desaparecido por decaimiento desde la explosión, como el ^{137}Cs ($T_{1/2} = 32$ años) y el ^{90}Sr ($T_{1/2} = 30$ años). De hecho,

los cocientes $^{239+240}\text{Pu} / ^{137}\text{Cs}$, $^{239+240}\text{Pu} / ^{90}\text{Sr}$ y $^{90}\text{Sr} / ^{137}\text{Cs}$ poseen unos valores bien definidos, asociados a la deposición global, con independencia de la latitud, siempre que consideremos para el estudio compartimentos ambientales en los que los radionucleidos no hayan experimentado posibles movimientos post-depositacionales, como migración, volatilización, etc.

Un cociente típico que caracteriza perfectamente el origen de la contaminación global integrada en un determinado compartimento es el cociente $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, que solo puede medirse con precisión con técnicas no radiométricas como la espectrometría de masas con acelerador (AMS). El valor de ese cociente en número de átomos es de 0.18 debido simplemente a la deposición global de contaminación radiactiva procedente de la estratosfera, mientras que en zonas afectadas además por contaminación local

ese cociente será en general inferior a 0.18, pues esas contaminaciones aportan una cantidad de contaminación con un cociente $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ claramente inferior.

La explicación de este último hecho es muy sencilla: el plutonio utilizado en las bombas nucleares originalmente presenta unos cocientes $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ muy bajos, denominándose de hecho ese plutonio como plutonio bomba, en el que se debe minimizar la presencia de ^{240}Pu , pues éste tiene la tendencia a captar neutrones durante la explosión nuclear y disminuir la efectividad de la reacción en cadena.

Una vez producida la explosión nuclear, la contaminación que forma parte de la deposición local o regional habrá experimentado generalmente una participación muy limitada en la reacción en cadena y estará caracterizada por un cociente $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ que experimenta muy pocas variaciones con respecto al



Figura 3: Partículas calientes formadas en Nuevo México (experimento Trinity, arriba) y en Semipalatinsk por la interacción de la explosión con los suelos de la zona.

Bombas Nucleares

Existen tres tipos fundamentales de bombas nucleares que a lo largo de la historia han sido utilizadas en pruebas nucleares atmosféricas:

Bombas de uranio. En este caso, en el interior de la bomba a una masa de uranio denominada sub-crítica se añade una cantidad adicional de dicho elemento con el fin de alcanzar una masa crítica que genere el comienzo de la fisión. Al mismo tiempo se le añaden otros elementos a la bomba con el objetivo de incrementar la generación de neutrones libres que puedan acelerar la reacción en cadena.

Bombas de plutonio. En este caso, la masa de plutonio, que es fisiónable, se rodea de explosivos plásticos que en su explosión comprimen el plutonio aumentando grandemente la densidad del material, lo que provoca instantáneamente la reacción en cadena.

Bombas termonucleares. Se fundamenta en la energía desprendida por la fusión de núcleos de deuterio ($2H$) y núcleos de tritio ($3H$) para dar núcleos de helio y neutrones de alta energía. Para generar la fusión es necesario un gran aporte de energía, que se genera mediante una bomba atómica de fisión acoplada.

Las bombas llamadas termonucleares o bombas de hidrógeno no son bombas de fusión puras, sino bombas de

fisión/fusión/fisión. La detonación del artefacto primario de fisión produce la reacción de fusión, que a su vez genera neutrones de alta velocidad que producen la fisión (^{238}U , ^{239}Pu) del secundario.

Las bombas de uranio y plutonio producen una liberación de energía claramente inferior a las bombas termonucleares. La bomba simplemente de fisión más poderosa, denominada Ivy King, fue probada a 170 m de altura el año 1952 por EE.UU. en el atolón Enewetak (Islas Marshall), y liberó un total de 500 kt. La bomba termonuclear más potente, denominada Zar, fue lanzada a 4000 m de altura el 30 de octubre de 1961 en Novaya Zelmya, con una liberación total de energía de 50 Mt.

En la Tabla 1 se recopilan algunos de los eventos más significativos relativos a las pruebas nucleares realizadas por las grandes potencias: EE.UU., Rusia (U.R.S.S.), Gran Bretaña, China y Francia.

Es de destacar finalmente que India y Pakistán realizaron su primera prueba nuclear subterránea en 1974, que Corea del Norte ha realizado pruebas nucleares a lo largo del siglo XXI (2006 y 2017) y que existen evidencias, aunque no certezas, de que Israel y Sudáfrica conjuntamente realizaron su primer test nuclear acuático en el Océano Índico al sur de Sudáfrica. ▀

plutonio bomba, mientras que en la contaminación radiactiva global, parte del ^{239}Pu experimenta su activación neutrónica a ^{240}Pu hasta incrementar los valores del cociente $^{240}Pu/^{239}Pu$ a 0.18.

Medidas realizadas en suelos de la provincia de Sevilla muestran unos cocientes atómicos $^{240}Pu/^{239}Pu = 0.18$, reflejando que la única fuente de contaminación de Pu en esos suelos es la deposición global estratosférica, mientras que en suelos colectados en zonas donde se realizaron un gran número de pruebas nucleares como Nevada y Semipalatinsk, el valor de ese cociente en suelos es claramente inferior a 0.05.

En las zonas afectadas por contaminación radiactiva local, en las zonas donde se realizaron numerosas pruebas atmosféricas a baja altura o superficiales, y generalmente con una liberación mo-

derada o baja de energía, se observa otro fenómeno. Gran parte de la contaminación radiactiva local se encuentra en forma de agregados o partículas formadas por la fusión del suelo en su contacto con la onda expansiva de la bomba nuclear, y su posterior solidificación. En la Figura 3 mostramos típicos conglomerados colectados en Nuevo México (EE. UU.) y en Semipalatinsk (U.R.S.S.), que contienen en la actualidad productos de fisión de alto periodo de semidesintegración como ^{137}Cs y ^{90}Sr e isótopos de Pu (cocientes atómicos $^{240}Pu/^{239}Pu < 0.04$). Estas partículas, conocidas coloquialmente como partículas calientes, forman parte de los archivos del grupo de Física Nuclear Aplicada de la Universidad de Sevilla, al que pertenece el firmante de este artículo.

Es interesante también destacar que

las partículas calientes formadas en zonas donde se realizaron pruebas nucleares presentan la particularidad de ser unas partículas muy refractarias, con una capacidad mínima de los radionucleidos contenidos en ellas a migrar o transportarse entre diversos compartimentos del medio ambiente. En esas zonas, donde la contaminación local domina y ésta se encuentra en forma de partículas o agregados, los modelos radioecológicos convencionales de transferencia de radionucleidos entre diversos compartimentos de un sistema no serán aplicables, al estar basados en coeficientes de transferencia determinados con precisión en zonas afectadas por deposición global, donde esos radionucleidos se han incorporado generalmente en forma de aerosoles. Las zonas del planeta afectadas fundamentalmente por contaminación local gene-

Tabla 1.

	Nombre del test	Año del test	Energía liberada	Lugar del test
Estados Unidos				
Primera bomba atómica	Trinity	1945	17 kt	Nuevo México
Primera bomba termonuclear	Ivy Mike	1952	10 Mt	Islas Marshall
Union Soviética				
Primera bomba atómica	RDS - 1	1949	22 kt	Semipalatinsk
Primera bomba termonuclear	RDS-6s	1953	400 kt	Semipalatinsk
Bomba termonuclear más potente	Zar	1961	50 Mt	Novaya Zelmya
Gran Bretaña				
Primera bomba atómica	Hurricane	1952	22 kt	Montebello (Australia)
Primera bomba termonuclear	Grapple	1967	1.8 Mt	Islas Christmas
Francia				
Primera bomba atómica	Gerboise Blue	1960	65 kt	Argelia
Primera bomba termonuclear	Canopus	1968	2.6 Mt	Fangataufa (Polinesia Francesa)
China				
Primera bomba atómica	—	1964	22 kt	Lop Nor
Primera bomba termonuclear	—	1967	3.3 Mt	Lop Nor

rada por pruebas nucleares atmosféricas se caracterizan por un coeficiente de transferencia suelo-agua y suelo-planta prácticamente nulos.

En las zonas de contaminación local, la distribución de radiactividad puede ser adicionalmente bastante inhomogénea de un punto a otro, al depender fundamentalmente del número discreto de partículas depositadas o acumuladas en cada punto. Ello, al contrario de lo que ocurre en zonas afectadas exclusivamente por contaminación global, dificulta enormemente hacer un inventario de la contaminación remanente en la zona bajo estudio.

Con la mentalidad actual, es difícilmente entendible por la opinión pública, expertos e incluso gobernantes, las condiciones de baja seguridad en que se realizaron muchas de estas pruebas nucleares, o incluso los motivos sociales y de progreso que ampararon algunas de esas pruebas. En este sentido:

a) Se realizaron pruebas como en Torsk (U.R.S.S.) con soldados situados en trincheras muy cercanas al epicentro de una bomba nuclear de baja potencia, con protecciones limitadas

ante la radiación y forzando a los soldados posteriormente a avanzar hacia el epicentro como un ensayo de posible rápida invasión del ejército de un territorio tras el lanzamiento sobre éste de una bomba nuclear.

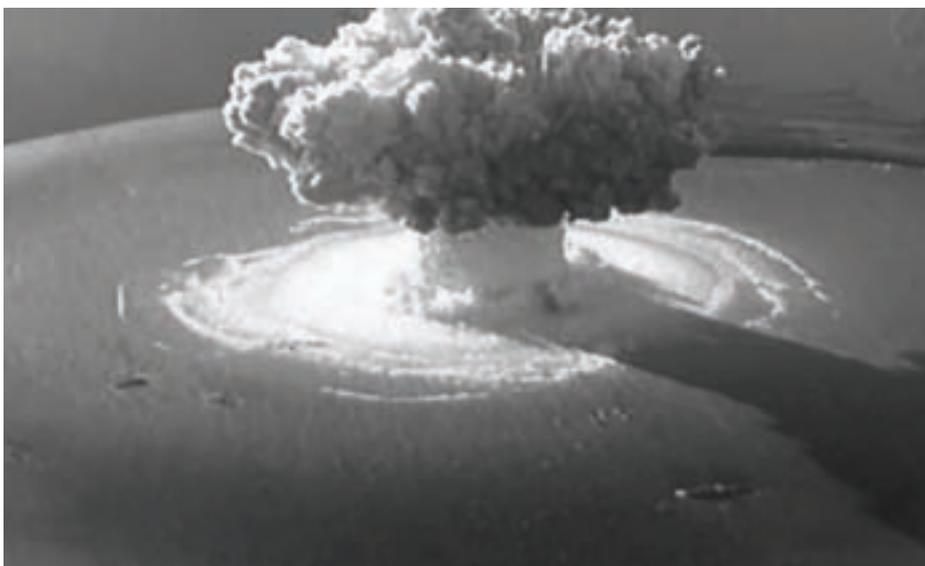
b) Se realizaron pruebas con poco control, en las que la energía liberada fue mucho mayor que la esperada con el consecuente avance de una nube radiactiva mucho mayor de la prevista hacia zonas pobladas que implicaron dosis no triviales, como en el caso de

alguna prueba nuclear realizada en las Islas Marshall, donde los habitantes del atolón Rongerik recibieron inesperadas dosis por la explosión de una prueba nuclear en las islas Bikini.

c) En varias islas del pacífico las poblaciones de algunas islas y atolones fueron desplazadas hacia otras islas para poder realizar esas pruebas nucleares (en algunos casos ese exilio forzado ha durado varios años o incluso persiste, por la contaminación radiactiva provocada).



Prueba nuclear, parte de la Operación Crossroads en el atolón de Bikini el 25 de julio de 1946.



Primera bomba nuclear detonada en Novaya Zemlya, en 1955.

d) Se realizaron pruebas nucleares con finalidades puramente ingenieriles, sin tener en consideración la energía liberada y la contaminación radiactiva asociada, como ocurrió en algunas pruebas nucleares realizadas en Semipalatinsk, que tuvieron como objetivo desviar el curso de ríos o la creación de lagos artificiales.

Era tal la frivolidad y falta de conciencia dominante que pruebas nucleares atmosféricas de baja potencia, como las realizadas en Nevada (EE. UU.), fueron consideradas como un atractivo turístico en la cercana ciudad de las Vegas. Se realizaron además numerosas pruebas cuya necesidad desde el punto de vista científico era más que dudoso, utilizándose fundamentalmente como una prueba de poder en plena guerra fría entre las grandes potencias.

Se realizaron pruebas desde cosmódromos o sitios análogos, donde la bomba nuclear se encontraba en el interior de un cohete que se hacía explotar a gran altura y a grandes distancias del punto del lanzamiento. Esas pruebas las realizaron los soviéticos desde el cosmódromo Kasputin Yar, situado en los Urales, realizándose la mayoría de las explosiones en la altura de Kazajistán, mientras que

ejército de EE. UU. realizó varias pruebas de este tipo en el Atlántico Sur en la denominada operación Argus.

Las dos grandes potencias no fueron los únicos países que realizaron pruebas nucleares atmosféricas a lo largo del siglo XX. Simultáneamente, Gran Bretaña realizó todas sus pruebas nucleares con anterioridad a la moratoria firmada en 1962, mientras que Francia y China no fueron signatarios de la moratoria y realizaron sus pruebas nucleares entre los años 1960 y 1980.

Gran Bretaña realizó la mayoría de sus pruebas nucleares en tres localizaciones sitas en Australia: la isla Montebello y los desiertos de Emu y Maralinga. Estas explosiones causaron en todos los casos una liberación de energía muy pequeña (varios kt) por prueba, aunque las emisiones radiactivas generadas afectaron a sistemas coralíferos únicos en las costas de Montebello. Adicionalmente, en el desierto de Maralinga se realizaron pruebas de seguridad que no implicaron la liberación de energía, pero si la liberación del contenido de las bombas fundamentalmente en forma de partículas calientes. También se realizaron pruebas nucleares atmosféricas en la isla Christmas, donde Gran

Bretaña explotó su primera bomba termonuclear.

La república francesa realizó la gran mayoría de sus pruebas nucleares en el Pacífico, en las islas de Mururoa y Fangataufa, aunque también realizó un par de pruebas con una muy pequeña liberación de energía en Argelia. Por su parte, China realizó sus pruebas nucleares en el desierto de Lop Nor, con liberación baja o intermedia de energía.

Cabe resaltar que la moratoria de 1962 no significó que las grandes potencias abandonaran el programa nuclear. Solo afectó a las pruebas nucleares atmosféricas por la preocupación creciente sobre la diseminación de elementos radiactivos en el medio ambiente. Se siguieron realizando gran cantidad de pruebas nucleares, pero subterráneas, lo que solo ocasionalmente provocó la liberación a la atmósfera de cantidades mínimas de gases radiactivos.

En este siglo XXI la realización de pruebas nucleares de cualquier tipo prácticamente ha cesado, salvo casos puntuales, a la vez que el arsenal nuclear bélico disminuyó en EE. UU. y en Rusia, en una época de cierto relajamiento tras la caída del muro de Berlín y el fin de la guerra fría. Únicamente en los tiempos que corren, con la invasión de Ucrania por Rusia se vuelve a mencionar el posible uso de armamento nuclear y la escalada destructora que podría generar. Es de esperar que la cordura impere y el uso bélico de la energía nuclear se ciera en la historia a las explosiones nucleares de Hiroshima y Nagasaki. ©

Vídeo de la prueba Zar realizada en 1961 por la Unión Soviética en Novaya Zelmya

