

LAS EXPLOSIONES NUCLEARES EN LA POLINESIA FRANCESA

Efectos en el medioambiente chileno.

Julio A. Vergara Aimone *



Introducción.

Entre septiembre de 1995 y principios de 1996, el Centre d'Experimentation du Pacifique (CEP) del Gobierno de Francia

realizó 6 de los 8 ensayos de armas nucleares anunciados en los atolones de Mururoa y Fangataufa, de la Polinesia francesa. Este artículo es un extracto¹ y refleja la situación conocida hasta el año 1995, en que se estimaron los efectos, bajo la perspectiva de Chile y su ambiente, dada la alarma que esto provocó en nuestra población y en distintos organismos nacionales. Este trabajo no trató los complejos aspectos éticos, políticos, disuasivos, tecnológicos o de otro tipo, de tales ensayos.

Descripción del Atolón de Mururoa y Fangataufa.

La Polinesia francesa fue colonizada por misioneros franceses a mediados del siglo XIV y anexada políticamente en 1946. Su población actual es de 220.000 habitantes, y mantuvo durante los ensayos tres mil personas en los atolones, de los cuales medio millar eran científicos, ingenieros y técnicos.

El atolón de Mururoa (Lat. 21° 50' S y Long. 138° 50' W) está ubicado en el archipiélago Tuamotu a aproximadamente 1.640

millas náuticas (mn) de isla de Pascua y 3.600 mn de Chile continental. Es una cadena de islas que forma un óvalo de 65 kms. de perímetro y 19 kms. en su extensión máxima, que posee un lagón, o laguna interior, que cubre una superficie de 140 kms. cuadrados con una profundidad media de 30 m. y un volumen de 4.2 kms. cúbicos de agua. El atolón posee una corona delgada con una superficie plana y rugosa, constituida por islas arenosas (motu) y tiene corredores de entrada y salida (hoas y avas) de 4.5 kms. de extensión que le permiten un flujo diario de cien millones de metros cúbicos de agua de mar. La figura 1 es un esquema del atolón de Mururoa y los perfiles A-B, C-D y E-F, dan una idea de su geomorfología.

El atolón de Fangataufa (Lat. 22° 14' S y Long. 138° 45' W) está ubicado a 25 mn al S.E. de Mururoa. Este atolón es de similar naturaleza a Mururoa, el cual tiene una forma rectangular de 30 kms. de perímetro y 10 kms. en su extensión máxima, con un lagón de alrededor de 48 kms. cuadrados.

Estos atolones son parte de un alineamiento de islas y montes submarinos de origen volcánico, conocido como cadena Pitcairn-Gambier, formados según la teoría de "puntos calientes", sugerida en los años 30, por científicos japoneses y luego ratificada por científicos estadounidenses en las islas Marshall (Eniwetok y Bikini), y geólogos franceses en Mururoa, previo a las respec-

* Capitán de Fragata. Ingeniero Naval. M.Sc. en Naval Architecture and Marine Engineering, M.Sc. en Materials Engineering, M.Sc. en Nuclear Engineering, y Ph.D. en Nuclear Materials Engineering, del Massachusetts Institute of Technology.

1. Extracto del trabajo "Efectos que Produciría sobre el Ecosistema Marino del Pacífico Sudoriental, las Explosiones Nucleares que Francia realizaría en el Atolón de Mururoa", presentado al Sr. Comandante en Jefe de la Armada en agosto del año 1995.

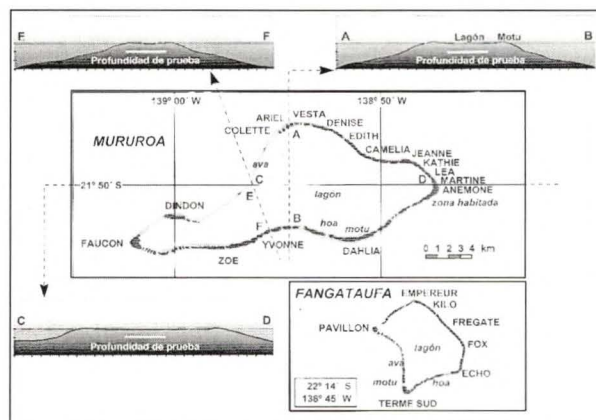


Figura 1. Esquema de los atolones de Mururoa y Fangataufa.

tivas explosiones nucleares en esos lugares. Los atolones fueron islas, las cuales debido a la solidificación progresiva del magma, a un desplazamiento respecto de su fuente de basalto, y a su peso, se contrajo su estructura volcánica, quedando sumergidos a cientos de metros bajo el nivel del mar, con su base sustentada a 4000 m de profundidad, en un proceso que tomó varios millones de años. Sobre la cima se ha desarrollado una estructura porosa de residuos calcáreos cimentados, predominantemente basado en carbonato de calcio, que permite un pequeño flujo de agua desde el mar hacia el lagón, y sobre ésta existe un delgado arrecife coralífero viviente muy productivo que va buscando la zona fótica, el cual va dejando a su paso tales residuos a medida que la estructura volcánica se ha ido sumergiendo.

Considerando la génesis de este tipo de estructuras geológicas, ésta debiera poseer adecuada resistencia a los esfuerzos de impacto, compresión y ruptura generados por las explosiones nucleares subterráneas, por la baja porosidad y fracturación del basalto, bajo la presión de un manto de rocas más porosas con cierto nivel de fracturación en bloques prismáticos, debido a una fase gaseosa disuelta en la fase subaérea del volcán y de una estructura coralífera superior. Además, se espera una cristalización tipo columnar del basalto por el enfriamiento peri-

metral de la lava en su ascenso vertical y posibles estrías de pocos metros de diámetro y cientos de metros de longitud causadas por las coladas submarinas de lava.

Descripción de los Ensayos Nucleares.

Un ensayo nuclear es la explosión parcial o total de una cabeza nuclear, con un propósito que puede ser "político-disuasivo", por ejemplo mostrar las capacidades tecnológicas propias a un adversario, o "técnico", es decir para modernizar una clase de cabezas nucleares, verificar la seguridad de que un arma no se acciona por motivos no programados o la confiabilidad de que el sistema nuclear militar va a funcionar cuando se necesite. Estos ensayos pueden tener fines "bélicos", por ejemplo desarrollar una cabeza militar de última generación, o "pacíficos", entendiéndose éstos como pruebas conducentes a desarrollar, por ejemplo, métodos para extraer recursos minerales profundos, detectar patrones mineralógicos, movimiento de tierra para la construcción de grandes obras civiles, etc., de los cuales se registra aproximadamente una centena. En la práctica, estos últimos, aunque cuenta con un gran potencial de beneficio, no existe una estructura y aceptación para su uso, debido a que se le asocian los usos bélicos, y a que las potencias nucleares perciben la amenaza de diluir su oligopolio de armas nucleares.

Según su diseño y uso final, estas armas o explosivos pueden tener un rango amplio de potencias. Desde el punto de vista militar, en los años de la guerra fría se probaron armas de creciente potencia hasta llegar a valores enormes, pero en el tiempo han predominado armas de potencia intermedia, las cuales con dispositivos de guiado muy precisos, y usadas en un arreglo, pueden llegar a ser más destructivas que las más potentes. También existen bombas avanzadas que pueden causar un daño más localizado, y recientemente se están desarrollando armas nucleares penetrantes.

Una bomba nuclear es un dispositivo esférico de unos 15 cms. de diámetro, de uranio-235 o plutonio-239, de muy alta concentración y pureza, que se somete a una poderosa implosión, a la vez que se expone a una fuente que inicia una secuencia de reacciones de fisión.² Con una tecnología básica, se pueden lograr potencias del orden de 20 mil toneladas (kilotones, kT) equivalentes de TNT, hasta un límite práctico de alrededor de los 100 kT, en la medida que se aumenta el combustible. Desde ahí, la fisión debe ser intensificada por medio de la fusión de núcleos livianos y, para llegar a niveles de cientos o millones (Megatones, MT) de toneladas de TNT, se requiere una 2ª fase completa de fusión de una masa de deuterio de litio-6, activada por la radiación de la bomba de fisión, e incluso puede tener una 3ª fase de fisión de un complejo reflector. Por otro lado, una bomba mixta de fisión-fusión, puede ser muy pequeña y producir una fracción de kT, lo que las hace "técnicamente" factibles de ser empleada en el campo táctico.

Los residuos de estas reacciones nucleares son un conjunto de sustancias radiactivas, siendo los de fisión más persistentes en el tiempo que los residuos de fusión, excepto aquellas armas que incluyen una 3ª fase de fisión.

En general, las potencias nucleares no anuncian todos sus ensayos, aunque se ha logrado detectar remotamente algunos de ellos usando aviones y satélites, principalmente por la radiactividad, el destello, la onda sísmica, y ventos accidentales, en el caso de los subterráneos. Sin embargo, hay maneras de burlar la detección, por ejemplo con ensayos subterráneos múltiples, amortiguados o simplemente de escasa potencia. Por ejemplo, EE.UU. hace algún tiempo reveló unos 200 ensayos no anunciados, de los cuales sólo la mitad fueron detectados en su oportunidad. Hasta mediados de 1995, se habían contabilizado con cierta confiabilidad

2.039 ensayos de armas y explosivos nucleares, predominantemente de EE.UU. y de la ex URSS, según se resume en el cuadro siguiente, el cual incluye el ensayo de Alamogordo y las bombas lanzadas sobre Hiroshima y Nagasaki, y debe agregarse un ensayo de India, realizado en 1974.

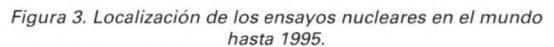
Del total de ensayos, 513 fueron realizados en la atmósfera, con el 86% de la potencia total, algunos de los cuales se detonaron en el espacio o bajo la superficie del mar. La gran mayoría ha sido en territorio continental, por ejemplo en el Nevada Test Site de EE.UU., Kazakhstan (Semipalatinsk), Uzbekistan, Turkmenistan e isla Nueva Zembla en la ex URSS, y Lup Nor en China. Inglaterra no realizó ensayos en su territorio, recurriendo a EE.UU. y Australia. La ex URSS fue el país que más contribuyó en potencia, pues con el 40% de los ensayos atmosféricos, disipó el 66% de la potencia total, con un promedio de 2.5 MT por ensayo. Sólo el 10% de estos ensayos fueron realizados en el hemisferio Sur, con el 5% de la potencia. Desde la fecha de su primer ensayo, EE.UU. ha sido el más activo, con un ensayo cada 18 días. Asimismo, desde que inició sus pruebas, la ex URSS ha realizado un ensayo cada 24 días, Francia uno cada 63 días, y China uno cada 270 días. Inglaterra ha sido el menos activo, con un ensayo cada 348 días.

En 1963, EE.UU., la ex URSS e Inglaterra firmaron el Tratado de Prohibición Parcial de Ensayos Nucleares (PTBT), para prohibir ensayos atmosféricos, espaciales o submarinos, pero Francia y China siguieron con éstos hasta 1974 y 1980, respectivamente. Esta tendencia se debía a cuatro razones. La 1ª y más evidente fue la creciente

Periodo 1945-1995	EUA	URSS	UK	Francia	China	Potencia
Ensayos atmosféricos	217	207	21	45	23	542 MT
Fecha del primer ensayo	(1945)	(1949)	(1952)	(1960)	(1964)	
Fecha del último ensayo	(1963)	(1963)	(1963)	(1974)	(1980)	
Ensayos subterráneos	815	508	24	159	19	87 MT
Fecha del último ensayo	(1992)	(1990)	(1991)	(1991)	(1995)	
Ensayos Totales	1032	715	45	204	42	629 MT

2. Para mayores detalles respecto a estos principios, ver Revista de Marina Nos. 4 y 5/97.

En los atolones de Mururoa y Fangata-ufa, las pruebas subterráneas se han realizado en pozos verticales de 1.5 a 2.1 m de diámetro perforados hasta profundidades que van desde los 500 a los 1.100 m, según la potencia del explosivo nuclear, el que se introduce en un contenedor de 1.5 m de diámetro y 19 m de alto, con los sensores requeridos para el ensayo. Probablemente, el contenedor se ha envuelto con boro u otro elemento absorbedor de neutrones, para reducir la activación radiactiva del basalto circundante, en un



Los primeros pozos se ubicaron en la periferia, o motu del atolón, y se llevaron hacia el centro del lagón, para aumentar la seguridad de contención. En la figura 4, se aprecia una vista en corte del atolón, la perforación y la composición geológica que rodea al pozo, así como las múltiples capas que sellan la carga explosiva. Algunos ensayos han sido de "seguridad", esto es verificar que no se crea la explosión nuclear bajo ciertas condiciones, en cuyo caso puede haber dispersión de combustible.

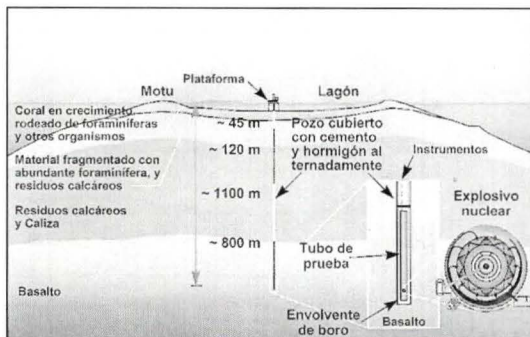


Figura 4. Diagrama de la perforación y disposición del explosivo en el atolón, antes del ensayo nuclear.

Ambos sitios se han mantenido equipados para este tipo de actividades desde la década de los 60, en una zona de relativa estabilidad sísmica, aislado de las zonas más pobladas, y su geología ha sido estudiada profusamente.

Se estima que habría motivaciones tecnológicas, destinadas a optimizar el diseño de cabezas nucleares, en particular las TN-70, TN-71 y TN-75, que los franceses habrían declarado como "sensitivas" por su optimización, aparte de "señales" político-estratégicas al bloque euro-asiático. Aparte de ello, esta serie consolidaría una base de datos para continuar realizando ensayos furtivos, o virtuales, previo a la inminente firma de un tratado de prohibición total de ensayos nucleares. Se especulaba que estarían destinadas a probar cabezas compactas para la producción de SLBM³ M-5 (con 12 MIRV's⁴ cada uno) para los SSBN⁵ clase Le Triomphant, y misiles crucero.

En este caso, se realizarían hasta 8 ensayos con potencias que fluctuarían entre 1 y 100 kT, que corresponden posiblemente a explosivos nucleares de última generación, neutrónicamente asistidos, de muy alta eficiencia, los que utilizan algunos kilogramos de combustible (idealmente un arreglo de capas de plutonio-239 y uranio-235 reflejadas con berilio) y algunos gramos

de hidrógeno-2 (deuterio) y precursores del hidrógeno-3 (tritio), dispuestos con todos sus accesorios en un volumen de no más de 20 litros. Antes de efectuar la explosión, el pozo en el basalto es sellado con cientos de metros de cemento, alternado con capas de hormigón. La magnitud sísmica prevista de las detonaciones de mayor potencia debiera ser inferior a 6 en la escala de Richter, insuficiente para producir un "tsunami". Durante los ensayos, el personal de los atolones permanece en sus puestos normales de trabajo.

Consecuencias radiológicas de los ensayos nucleares.

Una explosión nuclear produce ondas de choque, radiación térmica, radiación nuclear inicial y radiación nuclear residual. En materia de consecuencias radiológicas de los ensayos nucleares, sean atmosféricos o subterráneos, lo más relevante es lo último.

La radiación nuclear es la tendencia de ciertos núcleos atómicos inestables, que pueden haber llegado a esa condición por causas naturales o artificiales (como es el caso de los productos de fisión de las armas), a recuperar su estabilidad. Para ello, ese núcleo se acomoda y emite partículas cargadas (llamadas *alfa o beta*), con lo cual la especie cambia su identidad química, o emite radiación electromagnética de alta energía (llamada radiación gama), según la naturaleza de la especie radiactiva. Esta condición persiste por un tiempo finito propio de cada elemento. Mientras algunas permanecen radiactivas por pocos segundos otras lo hacen por algunos miles de años.⁶

El siguiente cuadro muestra la actividad máxima generada de algunos productos de fisión seleccionados, por cada kT de explosivo nuclear, según el tipo de combustible usado.

3. SLMB: Sea-Launched Ballistic Missile (misil balístico lanzado desde el mar).

4. MIRV: Multiple Independent Reentry Vehicle (dispositivos múltiples de reingreso independiente a la atmósfera).

5. SSBN: Submarino portador de misiles Balísticos y propulsión Nuclear.

6. Para mayores antecedentes respecto a fundamentos de los procesos nucleares y sus externalidades, ver Revista de Marina N° 3/95, pp. 259-277.

Radioisótopo	Semiperiodo	de Uranio-235	de Plutonio-239
Estroncio-90	27.7 años	$3.9 \cdot 10^{12}$ Bq ⁷	$2.4 \cdot 10^{12}$ Bq
Cesio-137	30.0 años	$6.7 \cdot 10^{12}$ Bq	$7.0 \cdot 10^{12}$ Bq
Kriptón-85	10.8 años	$9.6 \cdot 10^{11}$ Bq	$4.8 \cdot 10^{11}$ Bq
Rutenio-106	1 año	$3.2 \cdot 10^{13}$ Bq	$1.5 \cdot 10^{14}$ Bq
Yodo-131	8 días	$4.4 \cdot 10^{15}$ Bq	$5.6 \cdot 10^{15}$ Bq
Xenón-133	5.3 días	$8.8 \cdot 10^{15}$ Bq	$9.3 \cdot 10^{15}$ Bq
Yodo-132	3.3 días	$1.8 \cdot 10^{16}$ Bq	$1.8 \cdot 10^{16}$ Bq
Yodo-133	0.9 días	$6.3 \cdot 10^{15}$ Bq	$6.7 \cdot 10^{15}$ Bq
Yodo-135	0.3 días	$2.2 \cdot 10^{16}$ Bq	$2.1 \cdot 10^{16}$ Bq

Notas: 1) "Semiperiodo" de desintegración implica que al cabo del tiempo indicado, característico de cada especie, la actividad habrá decaído en 50%. Al cabo de 3 ó 6 veces ese lapso, el isótopo queda estable o se transmuta.
2) El plutonio no fisionado es peligroso para el ser humano por su toxicidad, de la misma manera que otros metales pesados (plomo, arsénico, cromo, cadmio, etc.)
3) La actividad máxima no implica mayor peligro radiotóxico. El mayor peligro relativo se asocia al estroncio-90 y cesio-137.

Aunque la energía liberada y su correspondiente actividad son grandes, hay que tener presente que la masa involucrada es pequeña. Por ejemplo, un explosivo de 100 kT utiliza pocos kgs. de uranio-235 o plutonio-239, mientras que para obtener potencias en el rango de Megatonnes se agregan algunos kgs. de deuterio y tritio, cuyos residuos radiactivos son relativamente "limpios". Al cabo de algunos meses, la radiactividad se deberá principalmente al cesio-137 y al estroncio-90. Por cada kT de energía liberada por el explosivo, se producen unos 0.8 gramos del primero y 0.4 gramos del segundo.

En términos comparativos y globales, si el mar pudiese atrapar todos los productos de las explosiones nucleares, se requerirían 10 mil MT para igualar su radiactividad natural, la cual es muy inferior a lo que los seres vivos pueden tolerar. La potencia de todo el arsenal nuclear emplazado en el mundo sería insuficiente para lograrlo. Durante los ensayos atmosféricos que se han realizado se liberaron 217 MT como potencia de fisión, responsable del estroncio-90 y cesio-137, además de otros 325 MT de fusión, que aminoran los efectos de los primeros pues transmutan parte de los productos. Asimismo, descontando los efectos de los ensayos de fusión "sucios", con fisión secundaria de la carcasa exterior, y discontinuados a partir de 1963, se han liberado unas 20 toneladas de productos. Si se compensan las posibles diferencias de información, la potencia total atmosférica no

debiera superar los 650 MT, en los cuales un 40% correspondería a potencia por fisión.

Además, se han detonado otros 87 MT en pruebas subterráneas, con efectos radiactivos relativamente confinados. De igual modo, la potencia total de estos ensayos podría llegar a un valor de 97 MT, al compensar diferencias de datos. Por ejemplo, de estos ensayos, sólo una fracción pequeña de ellos ha liberado cantidades medibles de Yodo-131 como resultado de venteo, por la evacuación con cráter abierto en explosiones poco profundas, pero su efecto desaparece en algunos meses por su corto semiperiodo. Se estima que la fracción liberada promedio de los ensayos con algún grado de venteo ha sido del 0.004% de la cantidad producida, y varios órdenes de magnitud menor al valor liberado en los ensayos atmosféricos. A este valor aportan 3 ensayos en Nevada que liberaron 4.1015 Bq de Yodo-131. La dosis colectiva proveniente de las explosiones pacíficas, muchas de ellas desarrolladas para mover tierra, y abrir canales, ha sido similar al valor anterior.

Como resultado de una explosión subterránea, la onda de choque forma una caverna en forma de esfera elongada con un platillo inferior de roca en fase líquida, que luego se solidifica como una lava vítrea, como se muestra en la figura 5. Esta onda fractura el basalto circundante, pese a su gran resistencia relativa, y los materiales expuestos a los neutrones quedan radiactivos.

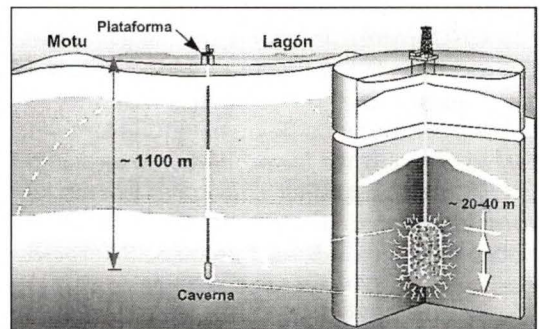


Figura 5. Forma y tamaño de la caverna después de un ensayo nuclear.

7. La unidad de actividad es el Becquerel (Bq) y representa una desintegración por segundo.

Efectos de los ensayos nucleares en el ser humano.

Para conocer cómo los ensayos nucleares podrían afectar a la población de Chile y su ambiente, se debe comprender primero cómo le afecta la radiación al ser humano, y luego cómo podría llegarle esta radiación a su ambiente.

La irradiación puede ser interna o externa al organismo. La radiación externa es más manejable debido al uso de barreras, o al manejo de la distancia y tiempo de la exposición. Por su carga eléctrica, las partículas alfa o beta sólo pueden penetrar una distancia muy pequeña. Por ejemplo, si se ubica una fuente radiactiva cerca de una persona, la piel o la ropa bastarán para protegerla. La radiación gama requiere de mayor cuidado, aún ante una exposición externa al cuerpo humano, pues como no tiene carga eléctrica, se necesitan distancias mayores para atenuar su energía.

La irradiación interna, por ingestión o inhalación, es más delicada cuando el organismo no tiene la capacidad de eliminarla, y su impacto puede ser más severo. La consecuencia más creíble de los ensayos sería la ingestión de especies radiactivas provenientes de los pozos. Si éstas llegaran y se fijaran en el cuerpo, y si su radiación tuviese suficiente energía, producirían los efectos que se mencionan más adelante. No obstante, el cuerpo, en general, sólo retiene ciertas cantidades de algunas sustancias.

El Comité Científico de las Naciones Unidas para la Evaluación de los Efectos de las Radiaciones (UNSCEAR), calculó los niveles acumulados de dosis-equivalente (en Sv,⁸ lo que permite la comparación directa de las diferentes especies, corregidas por los factores de peso de la Comisión Internacional sobre Protección Radiológica, ICRP) recibidas de las explosiones realizadas hasta fines de los 1980. Para la población mundial, la contribución de la ingestión, de 3 mSv, fue cuatro veces superior a aquella de la irra-

diación externa, de 0.68 mSv, que a su vez fue cinco veces mayor que la de inhalación, de 0.13 mSv, durante ese período. Como referencia, la dosis límite que el ICRP recomienda para un profesional del área nuclear es de 1500 mSv durante su vida laboral, que a su vez es un valor conservativo.

La importancia relativa de la ingestión se reduciría notablemente si se calculara una dosis-equivalente efectiva incompleta hasta fines del año 2000, en cuyo caso, la irradiación externa sería dominante, con carbono-14 como el principal contribuyente a la dosis de ingestión, por su largo semiperíodo. De las especies consideradas, sólo 7 aportan más del 1% de la dosis-equivalente efectiva al total de la población mundial, siendo en orden descendente de importancia: carbono-14, cesio-137, circonio-95, estroncio-90, rutenio-106, cerio-144 y tritio. Si únicamente se considerara la contribución de carbono-14 hasta el año 2000, el cesio-137 se convertiría en el radionúclido más significativo. El aporte de los otros elementos citados, sobre la población expuesta a la precipitación de los ensayos atmosféricos, ya ha sido superado por decaimiento. Si no hay más de esos ensayos, sólo el carbono-14 será significativo a la dosis anual para el tercer milenio.

Para la protección interna, se acostumbra a fijar "límites anuales de incorporación" (ALI, en Bq) por ingestión o por inhalación, para cada especie radiactiva, y asimismo, se fijan los "niveles de intervención derivados" (NID, en Bq/m³) para alimentos. En cualquier caso, los isótopos cesio-137, cesio-134, estroncio-90, estroncio-89, típicos productos de fisión, o americio-241 y plutonio-239, típicos de irradiación, son muy radiotóxicos, y en la mayoría de los estudios de impacto radioambiental figuran en términos de ALI o NID. Por ejemplo, para Cs-137, el ALI inhalado es de 6 millones y el NID es de 2000, para una retención total.

Se pueden distinguir dos tipos de radia-

8. La unidad de dosis efectiva es el Sievert (Sv) y representa la efectividad de la energía depositada en el organismo, la que puede variar por tipo de radiación, y de órganos, según su impacto biológico.

tividad: a) natural y b) artificial. La radiación natural, como su nombre lo indica, ha estado siempre presente en la Tierra. De hecho, hay muchos científicos que sostienen que un cierto nivel de radiación es necesario para una buena salud y para retardar el cáncer, pues los organismos vivos se han adaptado a ella en forma natural. Como antecedente curioso, según investigaciones japonesas, las personas expuestas a la radiación de las bombas atómicas de la Segunda Guerra Mundial han tenido en general una mayor sobrevivencia que sus pares no expuestos, lo cual es lógico comprender que no tiene pleno acuerdo entre los científicos.

En el ambiente terrestre hay especies radiactivas naturales mayoritariamente responsables de la exposición radiactiva total sobre seres vivos. La radiación cósmica solar, y en menor medida la radiación galáctica y la captura geomagnética actúan en los elementos del aire, la tierra y del agua, a lo cual se suman fuentes radiactivas naturales en la tierra. En el mar, se produce tritio, berilio-7, y aluminio-14. Así la radiactividad oceánica es enorme, del orden de $1.85 \cdot 10^{22}$ Bq, siendo el principal elemento el potasio-40, y una parte no despreciable, de alrededor de $3.7 \cdot 10^{19}$ Bq del tóxico radio-226, que nace de la cadena radioquímica del uranio-238.

Si consideramos el volumen del mar, que es de alrededor de $1.4 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$, cada litro de agua posee, en forma natural, 13.2 Bq. Las células de los seres humanos, y la mayoría de los seres vivos, incluyendo la fauna marina, se componen de un alto contenido de agua,⁹ por lo que parte de esta radiación está presente en sus cuerpos. El agua de mar contiene grandes cantidades de potasio-40, rubidio-87, etc., siendo todos elementos naturales, más uranio-235, uranio-238 y torio-232. Estas últimas especies dan lugar a tres cadenas de elementos radiactivos intermedios, hasta terminar en plomo-207, plomo-206 y plomo-208, que alcanzan esta-

bilidad, al cabo de varios millones de años.

El ser humano está expuesto a una dosis-equivalente anual de 1.8 a 3.6 mSv, de varias fuentes radiactivas, según el contenido de radón natural en el aire, con la siguiente distribución:

Fuentes naturales	Radiación cósmica:	30.0 %
	Fuentes naturales terrestres:	14.1 %
Fuentes artificiales	Televisores, materiales varios:	2.0 %
	Médicas, farmacéuticas, etc.:	51.2 %
	Industria nuclear:	0.2 %
	Ensayos nucleares atmosféricos:	2.5 %
Total:		100.0 %

Hay personas que valoran otras especies vivas y reclaman por ellas. Si se les adaptara una burda analogía a conceptos definidos para el ser humano, y restando algunas fuentes artificiales (médicas), estarían expuestos a una dosis entre 0.9 a 2 mSv al año, con un 90% de origen natural.

Desde 1945, una cantidad apreciable de especies radiactivas artificiales han sido introducidas por los ensayos nucleares atmosféricos, e inhaladas por el hombre para aportar hoy un 2.5% de su dosis promedio, especialmente en el hemisferio Norte. Al margen de éstos, el ser humano se expone normalmente a muchas radiaciones directas, para terapia y diagnóstico médico. Por otro lado, cabe señalar que el ser humano se beneficia indirectamente de radiaciones que esterilizan el instrumental médico, y mejoran la calidad de los alimentos, retardando la maduración, inhibiendo el brote en tubérculos, por citar unos pocos ejemplos. Estas aplicaciones casi no encuentran substitutes, y son respaldados por la WHO (World Health Organization), entre otras.

La radiactividad, sea natural o artificial, puede generar cambios a nivel celular en el ser humano, pues éstas no distinguen el origen, con efectos que dependen de la energía de las ondas o partículas, su carga eléctrica, la dosis y la naturaleza del organismo receptor.

9. Las células de los mamíferos están compuestas por 70 a 85% de agua, 10 a 20% de proteínas, 10% de carbohidratos y 3% de lípidos.

En general, la radiación ioniza las moléculas de agua y libera abundantes electrones secundarios de baja energía, que evolucionan en distintas especies moleculares y radicales (por ej. H_2O^+ , $\text{H}_2\text{O}^\bullet$, H_3O^+ , $\bullet\text{OH}$, e_{aq}^- , etc...) para luego recombinarse y formar nuevamente agua. Algunos de estos procesos son casi instantáneos, y otros toman más tiempo. Entretanto, ciertos radicales han interactuado con las cadenas helicoidales del ácido DNA, responsable de la información genética, alterando el entorno bioquímico e impidiendo la reproducción celular. La radiación también puede destruir directamente a esas cadenas. En días o años, dependiendo de muchos factores, esto puede producir diferentes enfermedades de diferente gravedad.

Los efectos finales sobre el ser humano pueden agruparse en 2 categorías: a) estocásticos, que ocurren estadísticamente, pero que no pueden asociarse a ciertas personas (por ej. cáncer a la piel), y b) no estocásticos, donde se correlaciona directamente la causa al efecto en una persona (ej. irritación por quemadura). Los primeros son demostrables sólo a dosis altas, después de alcanzar un umbral. Bajo ese límite no

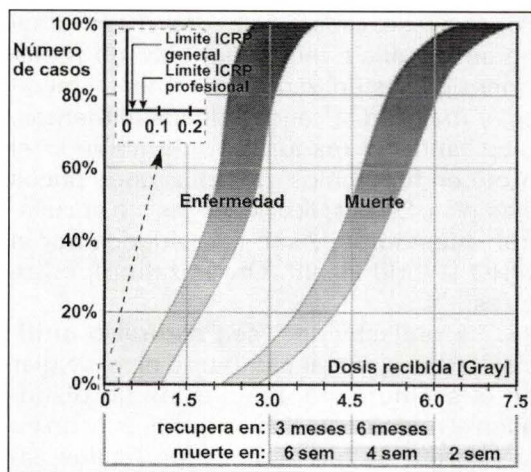


Figura 6. Relación entre dosis de radiación nuclear y sus consecuencias en el ser humano, hasta 7.5 Gy.

Parte del cuerpo	dosis-equivalente
Cuerpo completo personal expuesto	50 mSv/año
Cuerpo completo personas no expuestas	10% del anterior
Extremidades de personal expuesto	300 a 750 mSv/año
Emergencia urgente para salvar una vida	1 Sv (2 Sv para manos)
Acumulativo para personal expuesto	1.5 Sv

queda clara la relación entre la incidencia (enfermedad o muerte) y exposición a la fuente. La figura 6 muestra los resultados de exposición a las radiaciones de seres humanos, con distintos niveles, incluyendo bombas y prolongadas terapias. En general, una dosis de 7.5 Gy¹⁰ puede matar en un tiempo breve, en cambio una dosis de 0.1 Gy puede ayudar a prevenir el cáncer.

Sobre los datos obtenidos de organismos, enzimas y ácidos, además de animales de laboratorio, sobrevivientes de bombas, se han construido recomendaciones para personas expuestas profesionalmente (ej. trabajador de central nuclear) y personas no expuestas, para distintas partes del cuerpo, ya que no todos los órganos responden igual a las radiaciones y se deben aplicar factores de corrección. El siguiente cuadro, resume algunos límites típicos, que lógicamente son muy conservativos.

Es conveniente destacar que la ICRP, al recomendar el sistema que limita la dosis, señala que no se deben adoptar medidas a menos que implique un impacto neto positivo, y que las exposiciones deben ser mantenidas lo más bajas posibles, pero incorporando factores sociales y económicos.

Mecanismos de transporte de las especies radiactivas.

Los ensayos nucleares de las primeras décadas fueron atmosféricos, con lo cual la atmósfera constituía el medio primario de transporte, esparciendo una nube radiactiva según los vientos predominantes. La atmósfera tiene capas de diferentes propiedades. En la tropósfera, desde los 8 a 20 kms., según la estación y latitud, con un gradiente térmico marcado, ocurren todos los

10. La unidad de dosis equivalente es el Gray (Gy) y representa la dosis absorbida por el organismo. Se relaciona al Sv mediante un factor de calidad (FC) diferente para cada órgano.

fenómenos de evaporación, condensación y precipitación de agua o nieve. Sobre esta capa y hasta unos 40 kms. de altura se ubica la estratósfera, con una temperatura constante y estable. Entre ambas se ubica la tropopausa.

Los primeros ensayos en el archipiélago Tuamotu, desde 1966 hasta 1974, también fueron atmosféricos. De acuerdo a su posición, Mururoa queda bajo la influencia de los vientos alisios del S.E., los que mantienen un flujo regular hasta aproximadamente el meridiano 180° W y la latitud 20° S. Durante febrero se observa que el patrón general de los vientos alisios para el hemisferio Sur en la zona tropical, son preferentemente del Este, mientras que en agosto los vientos alisios muestran una tendencia del S.E., en asociación a la intensificación del anticiclón subtropical del Pacífico S.E.

El transporte de las especies radiactivas de tales ensayos atmosféricos sigue la circulación predominante, según la figura 7. Además, el efecto tiene relación con la potencia del explosivo nuclear, pues cuando éste es de gran potencia, los productos son elevados a una altura sobre los 20 kms., y por ende los residuos más finos ingresan a la estratosfera, dando lugar al fenómeno de precipitación global, con tiempos de residencia de 3 a 12 meses en la baja estratosfera polar y 8 a 24 meses en la baja estratosfera ecuatorial quedando la mayor parte de éstos atrapados en el hemisferio de inyección. Por esta razón, al contarse el 10% de los ensayos en el hemisferio Sur, con casi el 5% de

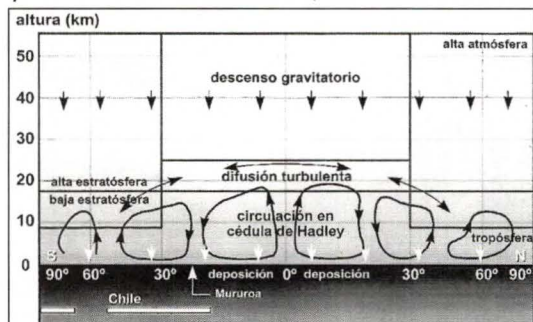


Figura 7. Circulación y transporte atmosférico predominante.

la potencia total, y sin ninguna inyección polar, se demuestra que éste tenga menos de la cuarta parte de la deposición radiactiva total. Aquellos de menor potencia relativa quedan suspendidos en la troposfera, y los aerosoles tienden a precipitar en forma paulatina dada la menor estabilidad relativa de esta capa, con un tiempo de residencia de 30 días. Por último, los ensayos nucleares subterráneos poco profundos o mal confinados pueden emitir especies radiactivas a la atmósfera por ventos, pero su deposición es local, por el efecto combinado de la gravedad y vientos superficiales.

Dentro de cada hemisferio la zona más afectada está comprendida entre latitudes 40° y 50°, motivado por las corrientes descendentes. En Chile, esto ocurre aproximadamente entre la Región de los Lagos y Región del General Carlos Ibáñez del Campo. Las mediciones realizadas en Puerto Montt comprueban este efecto, pues superan a las de otros lugares del país.

Aunque no existen datos de posibles zonas de mayor concentración de precipitación radiactiva en Chile, la dosis efectiva recibida por las personas que puede atribuirse a todas las fuentes artificiales, restando las fuentes médicas, sigue siendo bastante menor a la recibida de las fuentes naturales. En otros términos, las posibles consecuencias de la radiaciones de los explosivos nucleares, podría enmascarse por completo en la variabilidad de la radiación natural a la cual se ve expuesta la población.

Los ensayos más recientes han sido subterráneos, con mucho menor impacto ambiental y de menor potencia, según consta en la figura 2. Las especies radiactivas, para llegar al hombre, deben escapar de la fase vítrea, de la zona basáltica insular, llegar al mar y sumarse a las corrientes marinas.

Las explosiones nucleares subterráneas se consideran menos peligrosas, con respecto a la salud del ser humano. Lo anterior es cierto a escala global y a mediano plazo, debido a que el material radiacti-

vo queda confinado y vitrificado dentro de la cavidad subterránea y por lo tanto se dispersa muy poco. Sin embargo, en el largo plazo podría haber efectos de percolación en zonas cercanas a algún sitio de prueba, donde la gran onda de choque fractura el basalto local, pese a su gran resistencia relativa. En todo caso, la tasa de flujo de las especies por la roca, si es que escapasen de la fase vítrea, cuya disolución es extremadamente lenta, y si es que se dirigieran al mar, puede tomar muchos años en una estructura poco porosa, tiempo en el cual gran parte de la radiactividad habría decaído en forma natural.

Supongamos que las especies radiactivas llegan al mar. Para su transporte al continente, deben encontrar corrientes propicias. Estas masas de agua existen en planos verticales distintos, caracterizadas por movimientos relativos independientes, y diversas propiedades físico-químicas. En el caso de interés, se identifican dos masas de agua, las superficiales, que se producen por el viento, y las profundas, que se producen por cambios de densidad por distinta temperatura y salinidad. Las corrientes superficiales en el área de Mururoa, pertenecen al Circuito del Pacífico y son de baja intensidad relativa, con direcciones predominantes hacia el S.W., para luego desviarse hacia el Sur, como se muestra en la figura 8. En las partes centrales del circuito, donde está el atolón, la circulación superficial es baja, causando que el agua permanezca en el área. Las corrientes profundas en Mururoa son de muy baja intensidad, con dirección predominante al S.E. para luego dirigirse al paso Drake y al océano Atlántico. En la zona de convergencia oceánica, las corrientes superficiales se incorporan al flujo profundo, por efectos termohalinos, favoreciendo la homogenización de las corrientes y la difusión de los agentes en suspensión. A lo anterior, hay que agregar que ocurre una dilución de las especies presentes en estas corrientes.

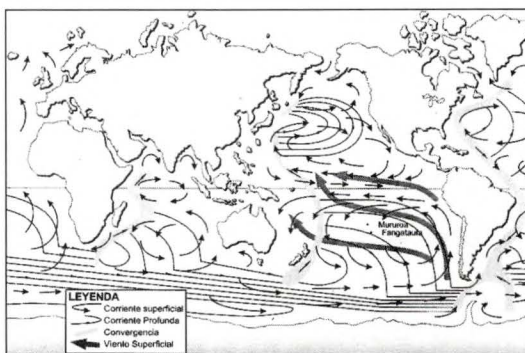


Figura 8. Principales corrientes y vientos superficiales en el Pacífico.

Efectos en Chile de los ensayos en las islas Tuamotu.

Francia ha venido realizando ensayos a una tasa promedio de 6 por año. Los últimos ensayos de 1996 fueron 6, que terminaron el 15 de julio de 1991. Los ensayos nucleares previstos para 1995-96 eran 8, seguidos por una moratoria indefinida de los ensayos "físicos".

En 1966, como producto de estos ensayos, se inició en Chile el Programa Nacional de Vigilancia de la Radiactividad Ambiental, a cargo del Ministerio de Salud, y traspasado a la Comisión Chilena de Energía Nuclear en 1975, para medir los contaminantes radiactivos del aire, mar, tierra y alimentos, y evaluar el potencial riesgo inmediato y de

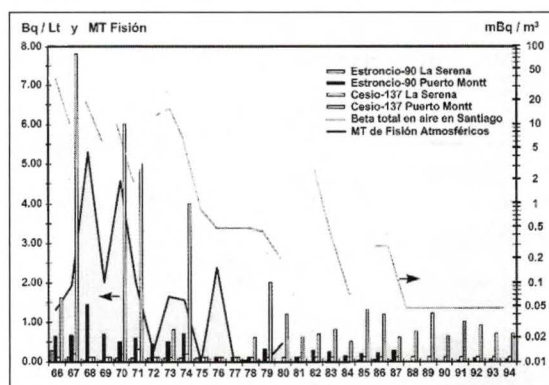


Figura 9. Mediciones en Chile de estroncio-90, cesio-137 en leche y radiactividad beta total en el aire.

largo plazo, extendido a cualquier actividad nuclear. La red actual posee 14 estaciones.

La figura 9 muestra las mediciones de estroncio-90, cesio-137 en leche, notándose un valor elevado de la actividad atmosférica en los años 60, sin llegar a ser peligrosa, la cual disminuyó en el tiempo, por el cese de los ensayos atmosféricos. Igual fenómeno se manifiesta con la actividad beta total en el aire de Santiago. En resumen, la exposición de la población chilena por efectos de estos ensayos ha sido mucho menor a la tolerada por el ser humano, y aproximadamente 1/4 de la recibida en el hemisferio Norte.

Asimismo, el bajo número total de ensayos subterráneos de la Polinesia francesa y su menor potencia total, el confinamiento local, y la magnitud y dirección de las corrientes marinas predominantes han protegido a las costas chilenas de las especies radiotóxicas generadas.

El seguimiento de los niveles de radiactividad, por parte de Chile y de otros países, ratifican que no debe haber motivo de alarma ambiental, pues quedan notablemente cubiertos en la radiactividad natural, donde destaca el potasio-40. Las periódicas mediciones de fauna marina tales como peces, moluscos y crustáceos, como asimismo del agua de mar y sedimento marino, en busca de especies radiactivas artificiales, han arrojado valores inferiores a los límites aceptables, y en ciertos casos bajo los límites de detección de los equipos. También se han detectado elementos radiactivos derivados de las series naturales del uranio y torio.

Desde el inicio de las pruebas en Mururoa y Fangataufa, en 1966, se han efectuado varios estudios radioquímicos, algunos de ellos en misiones de carácter oficial por el Comisariato de Energía Atómica de Francia. Entre 1979 y 1986 se llevaron a cabo mediciones para conocer la concentración de cesio-137 en 50 estaciones de muestreo alrededor del lagón de Mururoa. Desde 1987, y con metodologías mejoradas para estas mediciones, se redujo a sólo 10 estaciones de muestreo. Entre

estos estudios, destaca el informe de Y. Bourlat y G. Martin de 1992, destinado a verificar las trazas de cesio-134 reportados anteriormente por la Fundación J. Cousteau. Sus resultados se compararon con las mediciones de radiactividad en la superficie oceánica cercana al atolón y con medidas en el mar de la Polinesia francesa.

Este concluyó que desde 1986, no ha existido variaciones respecto de la Polinesia francesa, habiendo sido antes algo superior en Mururoa, debido a la precipitación radiactiva de los ensayos atmosféricos. Los sedimentos del lagón constituyen un depósito de cesio-137 que está constantemente en disolución y es advechado al océano Pacífico Sur, a pesar que el cesio tiene un bajo coeficiente de partición entre la fase carbonatada y la fase líquida de agua de mar. Durante la década de los 80, la concentración de cesio-137 en el agua de mar alrededor del atolón no fue afectada, por la débil disolución del cesio precipitado en el lagón. El cesio-137 es más importante en las mediciones, a pesar que emite radiación beta como el estroncio-90 y tritio, no sólo por su mayor actividad inicial y semiperíodo, sino que también por tener mayor absorción gastrointestinal y por tener una fracción de su decaimiento que termina en una emisión de radiación gama por el isótopo sucesor.

En el estudio se determinó una concentración media de cesio-137 en la superficie oceánica era 2.6 Bq/m³ en los años 90, homogénea hasta los 200 m de profundidad, valor que corresponde a la "radiactividad ambiente" de las pruebas atmosféricas. La actividad de cesio-137 en la superficie decrece más rápidamente que su valor teórico, con una vida media aparente de 15 años, por procesos de mezcla vertical, que transfieren esta especie a profundidades intermedias por lo que se ha nivelado respecto de las aguas de la Polinesia. En aguas del lagón, no se detectó cesio-134, un producto fresco de fisión de corto semiperíodo, aún con un límite de detección de 0.05 Bq/m³, sugiriendo que las muestras tomadas por la

Fundación J. Cousteau pudieron haberse contaminado por accidente. Sólo se detectaron trazas de cesio-136 al perforar un pozo luego de un ensayo.

Las mediciones en esa región han estado circunscritas a una franja superficial en el mar, demostrándose que la radiactividad equivale al valor de fondo, derivados de los ensayos atmosféricos hemisféricos, o bien como resultado de los ensayos de gran potencia realizados antes de 1963 en las islas Marshall, islas Fénix (Kiribati) y en otras áreas continentales y oceánicas.

No obstante que los niveles actuales son muy bajos, es legítimo preguntar qué pasará a futuro. A continuación se evalúan los escenarios para estimar las consecuencias de una falla de contención, o del debilitamiento de la capa basáltica, restringido a la dispersión del cesio-137.

J. Ribbe y M. Tomczak utilizaron un modelo numérico de dispersión-difusión

tridimensional por el método Monte Carlo para el cesio-137 en un período de 120 meses, para evaluar el impacto de las pruebas nucleares subterráneas (el efecto de las atmosféricas ya es conocido) en el atolón de Mururoa, acoplado un campo de velocidades atmosféricas y oceánicas, desarrollado por S. Manabe y R. Stouffer. Se consideraron dos situaciones:

a) Un caso hipotético de evacuación simultánea, antes de que decaiga la radiactividad en forma natural, de un equivalente a 97 MT de material radiactivo almacenado en distintos lugares del atolón, ignorando la capacidad de retención del basalto y de la lava vítrea.
b) Un caso más conservador de liberación lenta del 10% del material radiactivo señalado anteriormente.

El caso más conservador puede relacionarse a los arcos de la figura 5, que indican que la distancia mínima para el escape de los productos radiactivos a la estructura

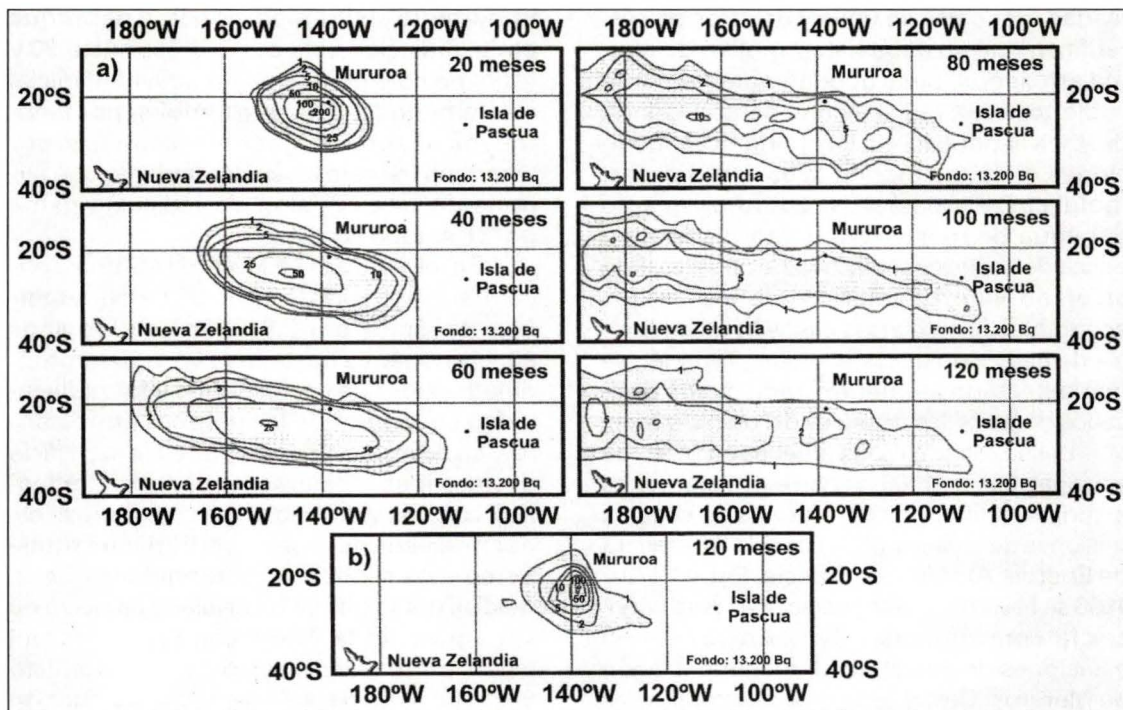


Figura 10. Representación de la radiactividad superficial del cesio-137: a) expulsión de todo el inventario, b) 10% del inventario.

calcárea es azimutal, al igual que la distancia hasta la zona de coral viviente. La fractura del basalto o un ensayo mal confinado, podría comunicar especies a una zona húmeda y desde esa zona llegar al agua de mar por la zona de residuos calcáreos. Esto pudo justificar el desplazamiento de los ensayos desde los motu hacia el lagón del atolón.

La modelación de tales autores indica el nivel de contaminación en un lapso de 10 años, donde los contornos son 10, 25, 50, 100, 250, 500, 1000 y 2000 Bq/m³. La figura 10 grafica el caso a) en intervalos de 20 meses cada vez. Este estudio se ha corregido en la magnitud de la fuente, pues el modelo asumió para el atolón la potencia acumulada equivalente a todos los ensayos subterráneos efectuados en el mundo. En tal estudio se aprecia que, en el peor de los casos, el nivel normal de cesio-137 de la isla de Pascua aumentaría el nivel natural de 13.200 Bq/m³ en un valor despreciable (0.008%). Se indica también el caso b) a 120 meses de haberse producido el "venteo" del 10% del inventario, al cual también se le ha corregido el valor de la fuente.

Conclusiones.

El propósito de este trabajo ha sido describir algunos efectos radiológicos en el medioambiente chileno, que se han producido y que se podrían producir en el tiempo como consecuencia de las explosiones nucleares en la Polinesia francesa, los cuales se comparan con la radiación a la cual el hombre está sometido en forma natural.

De acuerdo a los antecedentes, puede comprobarse que las consecuencias radiológicas de los ensayos nucleares recientes se ha magnificado en exceso. Los residuos radiactivos resultantes de los ensayos atmosféricos, que fueron interrumpidos en 1974 en Mururoa, nos afectan menos en términos relativos, ya que nuestro país está comparativamente protegido con respecto a los países del hemisferio Norte, por los vientos y fenómenos atmosféricos, y por las corrientes marinas. En el hemisferio Sur se hicieron 41 ensayos atmosféricos en

Mururoa, y 3 en Malden, esto es menos del 10% del total de esos ensayos. Aún si no tuviésemos esta protección natural, la radiactividad total en la atmósfera sería muy baja en proporción de la radiactividad natural. Esta baja contaminación no ha sido siempre así, pues se registra casos muy adversos, como el ensayo "Mike" de 13 MT en Eniwetok en 1952, con grave degradación del ambiente local, y la serie de ensayos de la Operación Castle, realizados en Bikini en 1954, con 3 pruebas termonucleares de potencia superior a los 11 MT ("Bravo" fue de 15 MT) que dejó inhabitable a ese atolón.

Por otro lado, los ensayos subterráneos son mucho menos contaminantes que los atmosféricos, tanto por quedar la mayoría de sus productos inmovilizados en una fase vítrea y confinados en una cavidad profunda, como también por su menor potencia relativa. Además, el basalto circundante es resistente y poco permeable, y en el supuesto ficticio de poder recuperar todo el material radiactivo y diluirlo en el mar, su valor en el territorio chileno sería ínfimo comparado con la radiactividad natural, y por ende no tendría efectos en la población ni en su entorno.

Este trabajo no pretende justificar el uso político de estas armas, la existencia de decenas de miles de armas nucleares, ni de sus ensayos. No menos se pretende justificar una guerra nuclear, cuyos efectos radiológicos globales serían algunos órdenes de magnitud superiores a los señalados más arriba, aparte de los daños instantáneos de choque y fuego y efectos retardados de cambio climático y contaminación. Tampoco se desea justificar a los actuales ensayos de armas nucleares, que hoy en día son realizados de otro modo, mucho más furtivo y elegante, con altos presupuestos y equipos avanzados.

Asimismo, no se discute el impacto negativo en el desarrollo de la energía nuclear para generación eléctrica, propulsión de buques y otras aplicaciones en muchos campos tecnológicos, ni la potencialidad del uso limitado, bajo el debido control internacional, de explosivos nucleares con fines pacíficos.

BIBLIOGRAFIA

- Binard N., Hékinian R. y Stoffers P., Morphostructural Study and Type of Volcanism of Submarine Volcanoes Over 13 the Pitcairn Hot Spot in the South Pacific, *Tectonophysics*, 206 (1992) 245-264.
- Bourlat Y. y Martin G., Precise Determination of the Concentration of Radio-Cesium in the Water of Mururoa Lagoon, *J. Environmental Radioactivity* 17 (1992) 13-29.
- CCHEN, Radiactividad Ambiental en Chile, Informe Anual 1993.
- Igor Tomicic, Radiación y Medio Ambiente, apuntes del Curso Elementos de Protección Radiológica Operacional CEPRO, DSNR-CCHEN, 1995.
- Kosta Tshipis, Third Generation Nuclear Weapons, Stockholm International Peace Research Institute, SIPRI Yearbook 1985.
- Mine et al., The Current Mortality Rates of A-Bomb Survivors in Nagasaki City, *Japan Journal of Public Health*, Vol 28, 1981, 337-342.
- Needler G.T., y Templeton W.L., Radiactive Waste: The need to calculate an oceanic capacity, *Oceanus* 24 (1) Spring 1981, 60-67.
- Ribbe J. y Tomczak M., An Impact Assessment for the French Nuclear Weapon Test Sites in French Polynesia, *Marine Pollution Bulletin*, Vol 21 N° 11, 1990.
- Schroeder, D., Science and Technology and the Nuclear Arms Race, Wiley and Sons, N. York, 1984.
- Serie Bimensual: The Bulletin of the Atomic Scientists.
- Siddons, Production of Radioactivity in Peaceful Nuclear Explosions, IAEA International Conference on Peaceful Nuclear Explosions, IAEA- PL-388-3/18, Vienna, 1973.
- The Road from Alamogordo, *The Economist*, Science and Technology, June 24th, 1995.
- Turner. J., Atoms, Radiation, and Radiation Protection, Pergamon, 1986.
- United Nations Environment Programme, Radioactivity in the South Pacific, UNEP Regional Seas Reports and Studies N° 40, 1984.
- United Nations Science Committee for the Evaluation of Radiation Effects (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionizing Radiation, 1993.
- Vergara J., El Proyecto Manhattan, *Revista de Marina* N° 4/1997 y N°5/1997.
- Vergara J., Transporte Marítimo de Materiales Nucleares, *Revista de Marina* N° 3/1995, 259-277.

