

capítulo II

FUENTES DE EXPOSICIÓN

II.I. INTRODUCCIÓN

Las radiaciones ionizantes aportan significativos beneficios a la sociedad, en áreas tan diversas como, por ejemplo, la medicina, la generación de energía eléctrica, la industria y la agricultura. No obstante, estos beneficios, para ser aceptables, no deben implicar riesgos que excedan los normalmente admitidos en la vida diaria.

Las radiaciones ionizantes -de no tomarse precauciones adecuadas- pueden provocar efectos nocivos sobre la salud de las personas que se exponen a ellas, efectos que son de dos tipos y que se denominan **determinísticos y estocásticos**.

El proceso de ionización produce cambios en átomos y moléculas. En las células, algunos de los cambios iniciales pueden tener consecuencias a corto y a largo plazo. Si ocurre daño celular y éste no se repara correctamente, la célula puede ser incapaz de sobrevivir o de reproducirse, o convertirse en una célula capaz de reproducirse, pero

modificada. Estos resultados tienen consecuencias diferentes para el organismo en su conjunto.

La función de la mayoría de los órganos y tejidos del cuerpo humano no es afectada por la pérdida de pequeñas cantidades de células, y a veces ni siquiera por la pérdida de un número considerable de las mismas; pero si el número de células perdidas es lo suficientemente grande y tales células son, a su vez, bastante importantes, hay una lesión observable, que se manifiesta en una pérdida de función del tejido. La probabilidad de causar tal lesión es cero a dosis pequeñas de radiación, pero por encima de cierto nivel de dosis - denominado umbral- aumenta abruptamente hasta llegar a la unidad. Por encima del umbral, la gravedad de la lesión también aumenta en relación con la dosis. Este tipo de efecto se llama **determinístico**, porque si la dosis es suficientemente alta ocurre con seguridad. Si la pérdida de células puede compensarse por repoblación, el efecto es relativamente leve.

El resultado es muy diferente si la célula irradiada -en vez de morir- sufre una modificación. En este caso puede producir un "clon" de células hijas modificadas. El organismo tiene varios mecanismos de defensa muy eficaces, pero no es realista esperar que siempre sean totalmente efectivos. De esta manera, el clon de células producido por una célula somática modificada -pero capaz de reproducirse- puede causar, después de un período prolongado y variable, llamado el período de latencia, una enfermedad maligna. Su probabilidad de ocurrencia -pero no la gravedad- aumenta con la dosis. Este tipo de efecto se llama **estocástico**, que significa de carácter aleatorio o estadístico.

La radiación ionizante siempre estuvo presente en el ambiente, y el hombre ha estado expuesto a ella desde sus orígenes. La radiación proviene, principalmente, de fuentes naturales -como los rayos cósmicos y los materiales radiactivos presentes en la corteza terrestre- y, en menor medida, de fuentes artificiales, tales como las aplicaciones de radioisótopos en medicina e industria, la generación de energía nucleoelectrónica y los ensayos de armas nucleares que en las décadas del '50 y del '60 se efectuaban en la atmósfera. Ambas fuentes de radiación -naturales y artificiales- coexisten y constituyen el origen de la dosis de radiación que reciben todos los seres vivos sobre la Tierra.

II.2. MODELOS AMBIENTALES

No es posible, en la mayoría de los casos, determinar por medio de mediciones directas en el ambiente o en el hombre, las dosis debidas a la exposición a la radiación ambiental recibidas por la población. Para ello, es necesario utilizar modelos que representen el transporte de los radionucleidos desde el ambiente hasta el hombre.

II.2.1. MODELOS DE TRANSPORTE DE RADIONUCLEIDOS EN EL AMBIENTE

La cadena de acontecimientos que tiene lugar desde la emisión de material radiactivo al ambiente hasta su llegada al hombre se representa mediante una serie de compartimientos, relacionados entre sí por parámetros de transferencia. Los parámetros son constantes en el tiempo y a los modelos se los llama de **compartimientos en condiciones de equilibrio**. Estos modelos han sido adoptados por el UNSCEAR [1][2][3] para evaluar las dosis recibidas por la población y son los utilizados en Argentina, tal como en otros países.

II.2.2. PARÁMETROS DE TRANSFERENCIA

Los parámetros de transferencia se definen como el cociente entre la concentración acumulada de actividad en un compartimiento del sistema bajo estudio y la concentración en el compartimiento que lo precede.

En las **Tablas II.1. y II.2.** se presentan parámetros de transferencia medidos en la Argentina [4].

TABLA III. PARÁMETRO DE TRANSFERENCIA ENTRE EL DEPÓSITO EN PASTURAS Y LA LECHE PARA EL IODO I31

AÑO	CONCENTRACIÓN INTEGRADA EN LECHE (L)	DEPÓSITO (D)	L / D
	Bq d / l	MBq / km ²	Bq d km ² / MBq l
1962	165	740	0,22
1966	1000	5128	0,20
1967	161	610	0,26
1968	92	333	0,28
1970	169	707	0,24
1971	154	751	0,21
1972	259	988	0,26
1973	64	296	0,22
1974	314	1162	0,27
PROMEDIO			0,24

TABLA II.2. FACTORES DE CONCENTRACIÓN DE CESIO 137 EN BIOTA DE AGUA DULCE

ESPECIES	EXPERIENCIA EN EL AMBIENTE ACUÁTICO		
	CONCENTRACIÓN INTEGRADA		FACTOR DE CONCENTRACIÓN
	AGUA (A)	BIOTA (B)	
	Bq d / l	Bq d / kg	B / A
PECES			
<i>Asiphonichthys arenopterus</i>	82	27 106	330
<i>Cheirodon interruptus</i>	82	28 831	352
<i>Cichlasoma facetum</i>	82	39 920	487
<i>Cnestorodon decennaculatus</i>	82	21 767	265
<i>Pinelodus clarias</i>	82	30 556	372
<i>Plecostomus commersoni</i>	82	20 946	255
<i>Curimata sp.</i>	82	37 045	452
MOLUSCOS			
<i>Ampullaria insularum</i>	82	26 285	320
<i>Diplodon sp.</i>	82	40 249	490
<i>Biomphalaria sp.</i>	68	39 949	590
PLANTAS			
<i>Lemma polyhiza</i>	68	4469	66
<i>Ceratophyllum demersum</i>	68	9209	135
<i>Bacopa monieri</i>	68	4198	62

II.2.3. VÍAS CRÍTICAS DE EXPOSICIÓN DEL HOMBRE

El material radiactivo liberado al ambiente se dispersa, se diluye en la atmósfera y el agua, y posteriormente es transportado por el viento o los cursos de agua. A modo de ejemplo, a continuación se tratan las vías de exposición del hombre debidas a la liberación de dichos materiales en la atmósfera.

El modelo para evaluar el transporte de radionucleidos en la atmósfera, a escala local y regional, es el de una pluma de forma gaussiana estacionaria, con parámetros de dispersión basados en la clasificación de Pasquill sobre la estabilidad atmosférica. Para los radionucleidos cuya dispersión es mundial, se utilizan los modelos globales desarrollados por el UNSCEAR.

Dada una liberación de material radiactivo en la atmósfera, éste se traslada como una nube o penacho. En dicha circunstancia, las vías

principales de exposición son: irradiación externa por el material contenido en la nube e irradiación interna debida a la inhalación.

Posteriormente, los radionucleidos se depositan, en el transcurso del tiempo, sobre el terreno, exponiendo al hombre por tres vías importantes: irradiación externa por el material depositado, contaminación interna por inhalación del material resuspendido, y por ingestión de alimentos que han incorporado dicho material del terreno.

En la **Figura II.1.** se representan las vías críticas de exposición del hombre para radionucleidos liberados a la atmósfera.

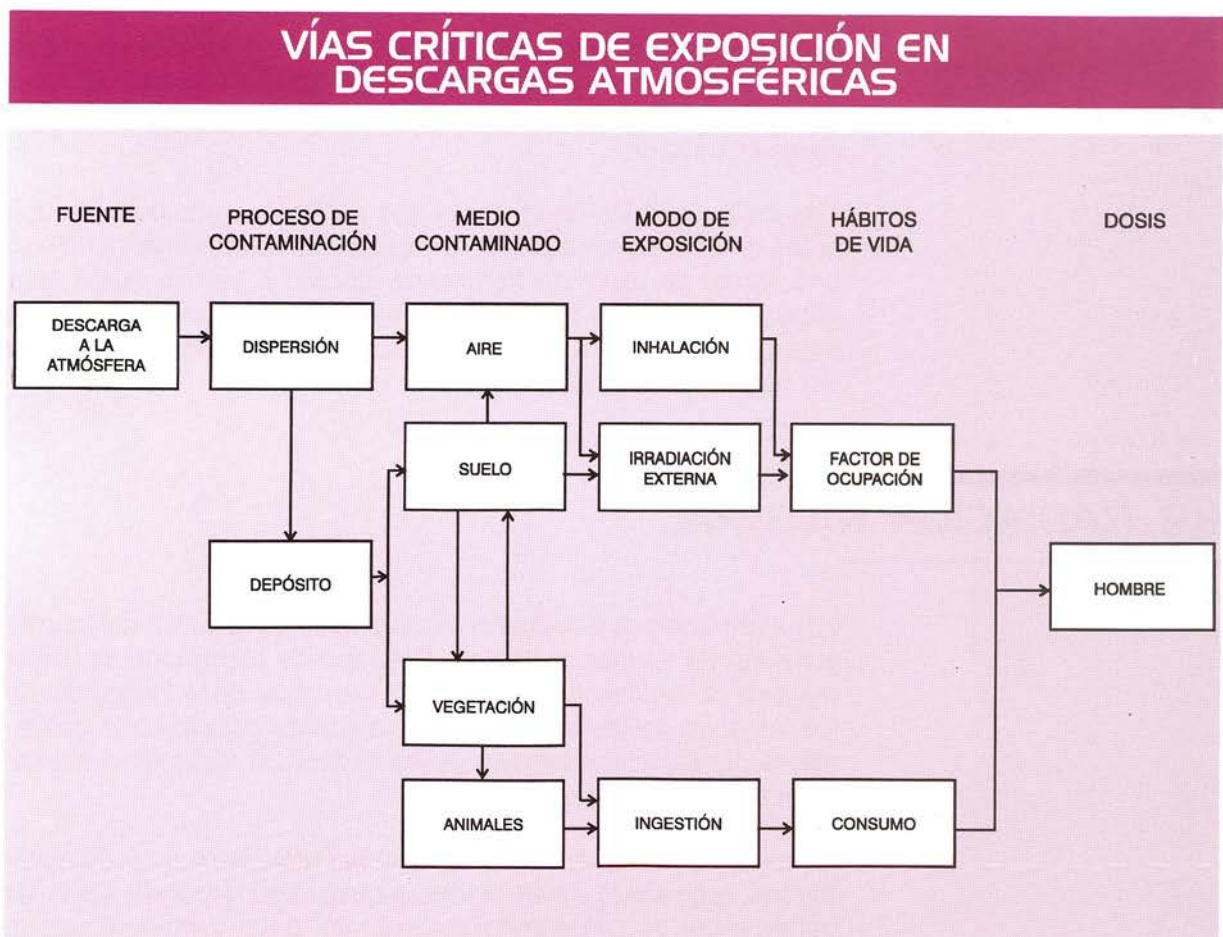


Figura II.1

II.2.3.1. VÍAS DE IRRADIACIÓN EXTERNA

Las dosis por irradiación externa debidas a material radiactivo disperso en la atmósfera dependen, principalmente, de la distribución espacial y temporal de la actividad, así como del tipo y energía de la radiación emitida por cada radionucleido. La radiación es atenuada por los edificios y vehículos de transporte, reduciéndose las dosis respecto a las que se tendrían a cielo abierto.

Cuando se consideran las dosis debidas al material radiactivo depositado sobre el terreno, sólo interesa la emisión de radiación gamma de dicho material. La tasa de dosis asociada al mismo va decayendo debido a la desintegración radiactiva y a la remoción de los radionucleidos de la superficie del terreno (v.g. remoción debida a la absorción de los radionucleidos por el suelo o el lavado ocasionado por las lluvias).

II.2.3.2. VÍAS DE IRRADIACIÓN INTERNA

La estimación de la irradiación interna de las personas, debida a la liberación de material radiactivo a la atmósfera, comienza con la determinación de la concentración de radionucleidos en el aire y de la actividad depositada en las superficies de interés. El paso siguiente es el análisis de la transferencia de los radionucleidos hasta el hombre.

Los radionucleidos son transferidos a distintos compartimientos antes de ser incorporados. En el caso del yodo, como se mencionó anteriormente, éste es transferido desde el aire al suelo (por depósito), y de éste al pasto; a su vez, el ganado alimentado con este pasto producirá leche contaminada que, finalmente, podrá ser consumida por el hombre.

II.3. RADIACIÓN NATURAL

La mayor parte de la radiación recibida por la población del mundo proviene de fuentes naturales. Este tipo de exposición es, en la mayoría de los casos, inevitable. La superficie de la Tierra, desde los orígenes del planeta, ha estado afectada por radiación proveniente del espacio exterior y de los materiales radiactivos constituyentes de la corteza terrestre.

Aunque todos los seres humanos están expuestos a la radiación natural, algunos lo están más que otros. Ello depende del lugar donde vivan; en zonas con rocas o suelos particularmente radiactivos, las dosis llegan a ser 20 veces mayores que los valores medios. La dosis también depende de la forma de vida de la población; la utilización de determinados materiales de construcción en sus viviendas, el cocinar con gas natural, el uso de calefacción con hogares a carbón y la aislación térmica de los ambientes. También los viajes en avión aumentan la exposición a la radiación natural. En la **Tabla II.3.** se presenta la contribución de las distintas fuentes de radiación natural, a la dosis recibida por la población.

TABLA II.3. DOSIS ANUAL DE FUENTES NATURALES EN ZONAS DE FONDO DE RADIACIÓN NORMAL

FUENTE DE RADIACIÓN	DOSIS EQUIVALENTE EFECTIVA ANUAL (μSv)	
	IRRADIACIÓN EXTERNA	IRRADIACIÓN INTERNA
Rayos cósmicos	380	
Radionucleidos cosmogénicos		12
Radionucleidos en la corteza, flora y fauna		
potasio 40	130	170
rubidio 87		6
Serie del uranio 238:		
uranio 238 - torio 230	140	1
radio 226		4
radón 222 - polonio 214		1200
plomo 210 - polonio 210		50
Serie del torio 232:		
torio 232 - torio 228	190	6
torio 220 - polonio 212		73
TOTAL	840	1522
TOTAL (aproximado)	2400	

II.3.1. RAYOS CÓSMICOS

Los rayos cósmicos causan poco menos de la mitad de la exposición del ser humano a la radiación natural externa. La mayoría de ellos tiene su origen en las profundidades del espacio interestelar y algunos son una consecuencia de las deflagraciones solares. Los rayos cósmicos irradian directamente a la Tierra e interactúan con la atmósfera produciendo diferentes materiales radiactivos y tipos adicionales de radiación.

Aunque ningún lugar del planeta escapa a ello, algunas regiones son más afectadas que otras. Por ejemplo, las zonas polares reciben una cantidad mayor de radiación que las zonas ecuatoriales. La exposición aumenta también con la altitud sobre el nivel del mar (factor más importante que el anterior), al disminuir la protección suministrada por la atmósfera.

Una persona que vive a nivel del mar recibe, en promedio, una dosis equivalente de aproximadamente 270 μSv por año de radiación cósmica, mientras que otra que se encuentre a 4000 metros de altitud recibe una dosis aproximadamente 7 veces mayor. La dosis promedio que recibe la población mundial debido a la radiación cósmica es 380 μSv por año.

Quienes viajan en avión, aunque por períodos más cortos, se exponen a dosis todavía superiores. Entre los 4000 metros sobre el

nivel del mar, que es la altitud de las poblaciones más elevadas (v.g. la de la ciudad de La Paz, Bolivia), y los 12 000 metros, que es el nivel superior de altitud de los vuelos intercontinentales, la exposición a la radiación cósmica se multiplica por 25. Esta aumenta aún más entre los 12 000 y los 25 000 metros, que es la altitud máxima alcanzada por los aviones supersónicos. La tasa de dosis a la que están expuestos los pasajeros de un vuelo comercial es alrededor de $3 \mu\text{Sv h}^{-1}$.

II.3.2. RADIACIÓN TERRESTRE

Los principales materiales radiactivos presentes en las rocas que constituyen la corteza terrestre son el potasio 40 y las dos series de elementos radiactivos naturales procedentes de la desintegración del uranio 238 y del torio 232. El rubidio 87 y el uranio 235 revisten menor importancia.

Los niveles de radiación natural terrestre alrededor del mundo difieren de un lugar a otro, en razón de la variación de la concentración de estos materiales en la corteza. Para la mayor parte de la población, tales diferencias no son especialmente significativas. Las evaluaciones realizadas por el UNSCEAR muestran que la dosis efectiva anual promedio de radiación externa es de $460 \mu\text{Sv}$.

Por otra parte, cabe decir que, en promedio, un tercio de la dosis efectiva recibida por el ser humano de las fuentes naturales terrestres procede de sustancias radiactivas que se encuentran en el aire, los alimentos y el agua. La dosis efectiva anual debida a la inhalación -excluyendo el radón-, ingestión de alimentos y agua, es $230 \mu\text{Sv}$, de los cuales $170 \mu\text{Sv}$ corresponden al potasio 40 y $60 \mu\text{Sv}$ a los radionucleidos de las cadenas de desintegración del uranio 238 y torio 232.

En el país no se han detectado zonas pobladas que tengan altas tasas de exposición a la radiación natural, ni alta concentración de radionucleidos naturales en alimentos y agua que puedan dar origen a dosis de radiación que se aparten significativamente de los valores promedios mundiales.

II.3.3 EL RADÓN

En los últimos años se ha determinado que la fuente de radiación de origen natural que más contribuye a la dosis efectiva recibida por el ser humano es un gas (incoloro, insípido e inodoro) denominado radón. El UNSCEAR ha estimado que el radón y los radionucleidos resultantes de su desintegración - conocidos como hijas del radón - contribuyen con las tres cuartas partes de la dosis efectiva recibida por el hombre debida a fuentes naturales terrestres, y con, aproximadamente, la mitad de la recibida de la

totalidad de las fuentes naturales. La mayor parte de la dosis debida al radón, especialmente en ambientes cerrados, proviene de sus hijas.

El radón se presenta en dos formas principales: el radón 222, uno de los radionucleidos presentes en el proceso de desintegración del uranio 238, y el radón 220 producido en las series de desintegración del torio 232. El radón 222 es unas 20 veces más importante, desde el punto de vista radiológico, que el radón 220.

El radón fluye del suelo en todas partes del globo, pero sus niveles en el ambiente varían mucho de un lugar a otro. Las concentraciones de radón en el interior de los edificios son, en promedio, unas 8 veces superiores a las existentes en el exterior. Si bien los materiales de construcción contienen elementos radiactivos naturales y suelen ser fuentes de emanación de radón, el terreno en el que se asientan las viviendas es casi siempre la fuente más importante. En países de clima frío, como en el caso de Suecia y Finlandia, donde las viviendas se mantienen cerradas la mayor parte del año y con un mínimo intercambio de aire con el exterior, la concentración de radón supera los 800 Bq/m^3 . Estos niveles altos no han sido observados en Argentina. En la **Figura II.2. a y b** se presentan los niveles de radón medidos en el interior de 400 viviendas de diversas ciudades del país. La concentración promedio de radón es de 35 Bq/m^3 y el valor máximo observado no superó 150 Bq/m^3 . La fracción de viviendas con concentración de radón mayor que 100 Bq/m^3 es inferior al 5%.

El UNSCEAR, en su informe del año 1993, estima una concentración media ponderada mundial de radón en el interior de viviendas, de 40 Bq/m^3 . En áreas continentales, el valor promedio, en el exterior, es de 10 Bq/m^3 y algo menor en áreas costeras.

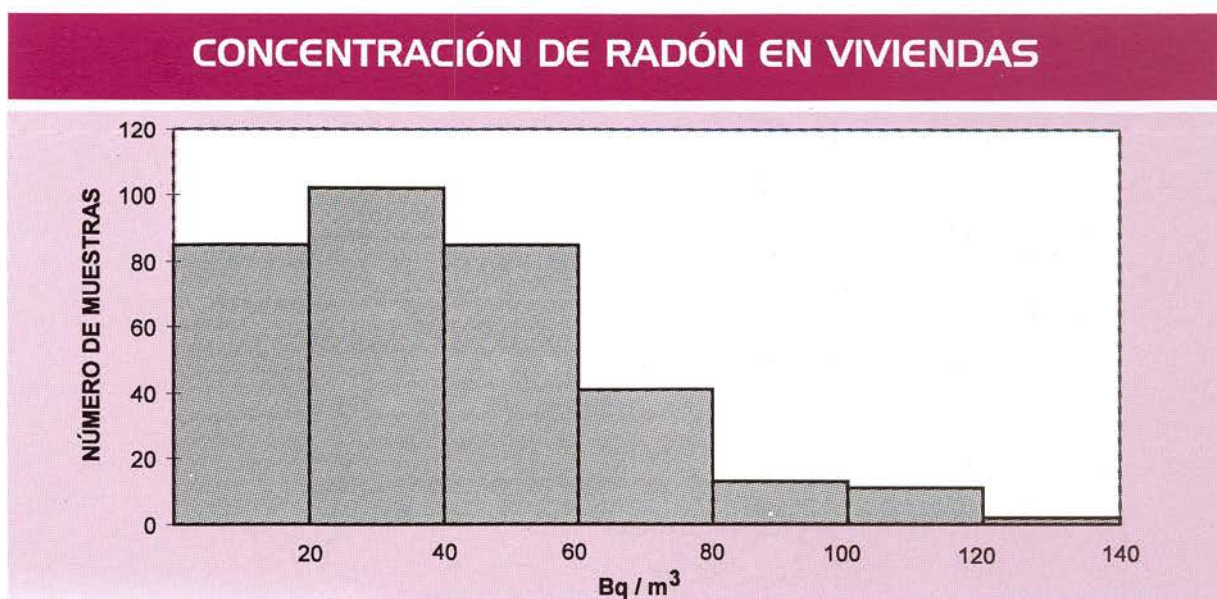


Figura II.2 a

DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS PUNTOS DE MUESTREO DE MEDICIÓN DE RADÓN EN VIVIENDAS

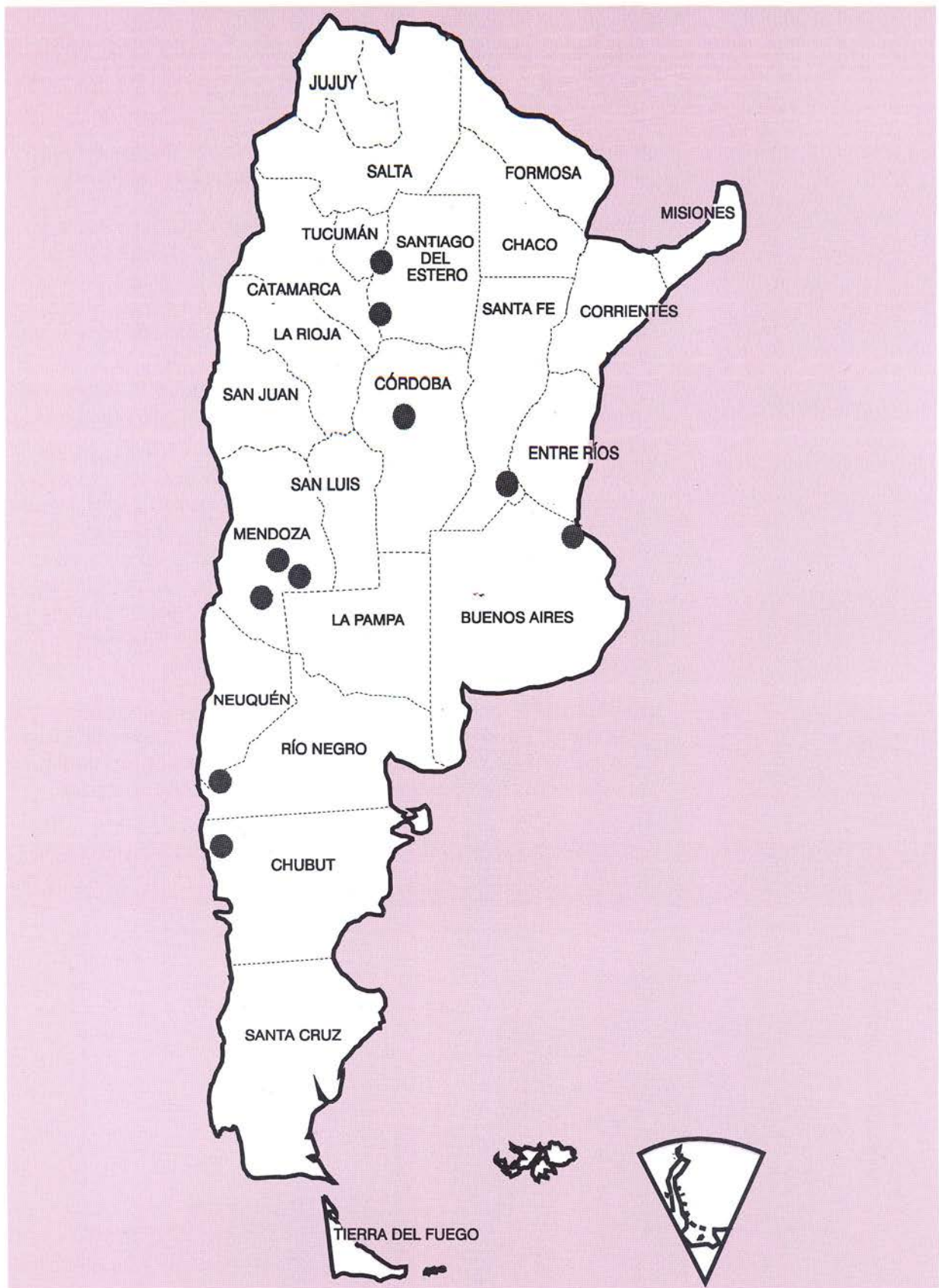


Figura II.2 b

II.3.4. OTRAS FUENTES DE RADIACIÓN NATURAL

El carbón de piedra, como la mayoría de los materiales naturales, contiene vestigios de radionucleidos. Su combustión produce la liberación de estos al ambiente y, consecuentemente, la exposición de personas.

Se estima que la producción de 1 Gwa de energía eléctrica por combustión de carbón origina una dosis efectiva colectiva comprometida total de 20 Sv hombre. Ello significa que en todo el mundo, la generación de energía eléctrica producida en centrales térmicas que queman carbón da lugar a una dosis efectiva colectiva comprometida de unos 8000 Sv hombre por año de operación [3].

Los fosfatos explotados de manera extensiva en todo el mundo constituyen, también, una fuente de emisión de material radiactivo al ambiente. La mayoría de los yacimientos de fosfato en explotación contienen relativamente altas concentraciones de uranio. La extracción y transformación del mineral produce la liberación de radón; por otra parte, los fertilizantes producidos con fosfatos también contienen material radiactivo, y una pequeña fracción de este material se incorpora a los alimentos. Se estima que la dosis efectiva colectiva en la población mundial, debida a un año de explotación de fosfatos, es 10 000 Sv hombre.

II.4. RADIACIÓN ARTIFICIAL

Hace unos 60 años, el hombre desarrolló el conocimiento de la forma de liberar la energía encerrada en el núcleo del átomo, primero con fines bélicos y luego para la generación de energía eléctrica y otras aplicaciones. Todo ese desarrollo trajo aparejado la producción artificial de cientos de radionucleidos, algunos de los cuales tienen aplicación en medicina, industria, investigación, etc. Como consecuencia de ello, la mayoría de la gente recibe una cantidad de radiación de origen artificial relativamente pequeña, a pesar de que en determinadas circunstancias y en áreas localizadas, la dosis resultante puede ser mayor que la natural. En la **Tabla II.4.** se muestra la contribución de las distintas fuentes de radiación artificial a la dosis recibida por la población.

TABLA II.4. COMPROMISO DE DOSIS A LARGO PLAZO DEBIDO A ACTIVIDADES Y PRÁCTICAS DEL HOMBRE (*).

FUENTE	RADIONUCLEIDOS PRINCIPALES	DOSIS EFECTIVA COLECTIVA (SV HOMBRE)
Ensayos de armas nucleares en la atmósfera	carbono 14, cesio 137, estroncio 90, circonio 95	30 000 000
Accidente de Chernobil	cesio 137, cesio 134, iodo 131	600 000
Generación de energía nucleoelectrónica**	carbono 14, radón 222	400 000
Producción y uso de radioisótopos(**)	carbono 14	80 000
Fabricación de armas nucleares	cesio 137, rutenio 106, circonio 95	60 000
Accidente de Kyshtym	cerio 144, circonio 95, estroncio 90	2 500
Reingreso de satélites a la tierra	plutonio 238, plutonio 239, cesio 137	2 100
Accidente de Windscale	iodo 131, polonio 210, cesio 137	2 000
Otros accidentes	cesio 137, xenón 133, cobalto 60, iridio 192	300
Ensayos subterráneos de armas nucleares	iodo 131	200

(*) Con fines de comparación, la dosis efectiva colectiva anual debida al fondo natural de radiación es 13 000 000 Sv hombre.

(**) Sólo la generación de energía nucleoelectrónica y la producción y uso de radioisótopos son prácticas continuadas, dando actualmente dosis colectivas anuales de aproximadamente 700 y 100 Sv hombre respectivamente. El compromiso de dosis colectiva a largo plazo debido a estas fuentes está referido a los nucleidos liberados al ambiente desde el comienzo de la práctica hasta 1990.

Las fuentes artificiales pueden ser controladas más eficazmente que las naturales, aunque la exposición a la radiación externa debida a la precipitación radiactiva, consecuencia de ensayos de armas nucleares que se realizaban en la atmósfera, es tan ineludible e incontrolable como la debida a los rayos cósmicos o a la radiación que proviene de los materiales radiactivos presentes en rocas y suelos.

Los principales contribuyentes a la radiactividad ambiental artificial son los ensayos de armas nucleares en la atmósfera, el accidente nuclear de Chernobil y en mucho menor escala, la generación nucleoelectrónica.

II.4.1. PRECIPITACIÓN RADIATIVA EN ARGENTINA

Durante los últimos 50 años la población mundial ha estado expuesta a la radiación proveniente de la precipitación radiactiva originada por ensayos de explosivos nucleares, que se efectuaban en la atmósfera.

Entre los años 1945 y 1980 la potencia total de las armas nucleares ensayadas en la atmósfera fue de 545,4 Megatones (1 Mega-

iodo 131 EN LECHE (Buenos Aires) Año 1974

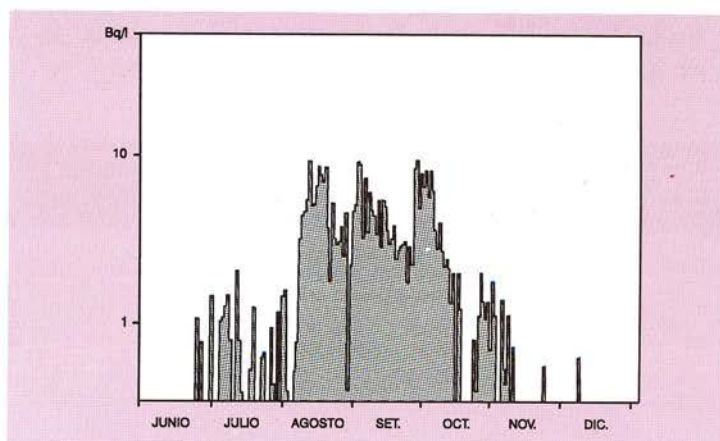


Figura II.3a

iodo 131 EN LECHE (Salta) Año 1974

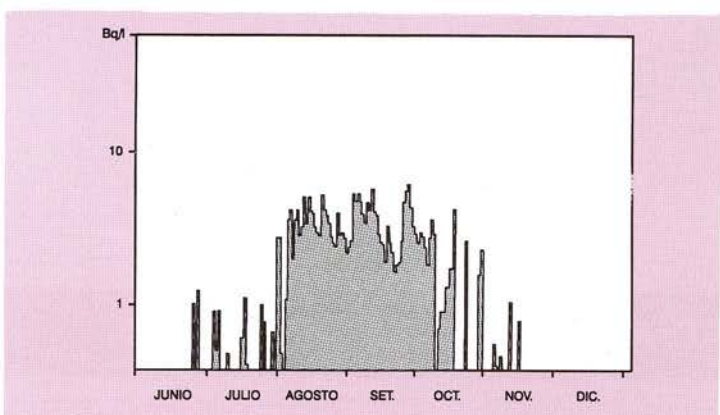


Figura II.3b

iodo 131 EN LECHE (Bariloche) Año 1974

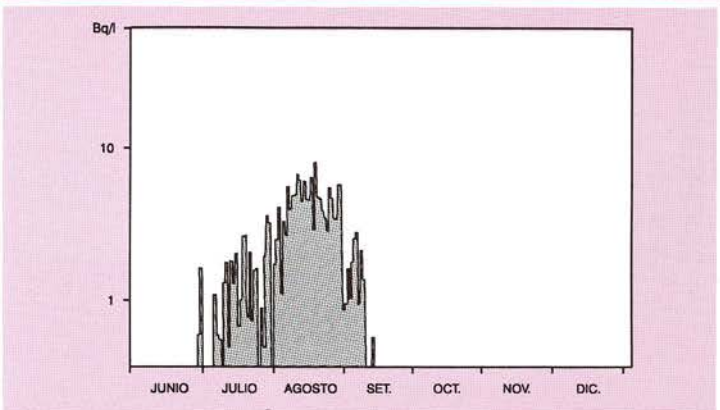


Figura II.3c

tón equivale a 1 millón de toneladas de TNT) y la dosis colectiva correspondiente fue estimada por UNSCEAR en $3 \cdot 10^7$ Sv hombre.

Las mediciones en Argentina se inician en el año 1959 como consecuencia de los ensayos realizados en el hemisferio norte. Con excepción de una serie de explosiones realizadas en 1962 que introdujo material radiactivo en el hemisferio sur, toda la actividad depositada sobre Argentina hasta el año 1966 fue de origen estratosférico. Por este motivo, el estroncio 90 y el cesio 137, por su largo período de semidesintegración, fueron los radionucleidos de mayor interés radiológico en ese momento.

Las detonaciones nucleares llevadas a cabo entre los años 1966 y 1974 en el Pacífico Sur, cambiaron la naturaleza de la precipitación radiactiva detectada en el país; aparecieron en su composición productos de fisión de semiperíodo corto e intermedio, en particular iodo 131 [5] [6]. En la **Figura II.3 (a, b y c)** se muestra la concentración de iodo 131 en leche, para el año 1974, en las ciudades de Buenos Aires, Salta y Bariloche.

En la **Figura II.4 (a y b)** se presenta la evolución en el tiempo de los depósitos de cesio 137 y estroncio 90 medidos en suelos de la Provincia de Buenos Aires.

La determinación de la concentración de actividad en el aire, así como la medición del depósito del material radiactivo, han permitido obtener información sobre el movimiento de los nucleidos en distintos compartimientos del ambiente. En Argentina, la leche vacuna y los cereales constituyen el principal aporte de estroncio 90 en la dieta, mientras que la leche, la carne y los cerea-

137. La principal fuente de incorporación de iodo 131 es la leche fresca. En la **Figura II.5. (a y b)** se presenta la evolución en el tiempo del contenido de cesio 137 y estroncio 90 en leche, medidos en la Argentina. En la **Tabla II.5 (a y b)** se presentan medidas de la concentración de los mismos radionucleidos, en alimentos.

DEPÓSITO DE CESIO 137 EN BUENOS AIRES

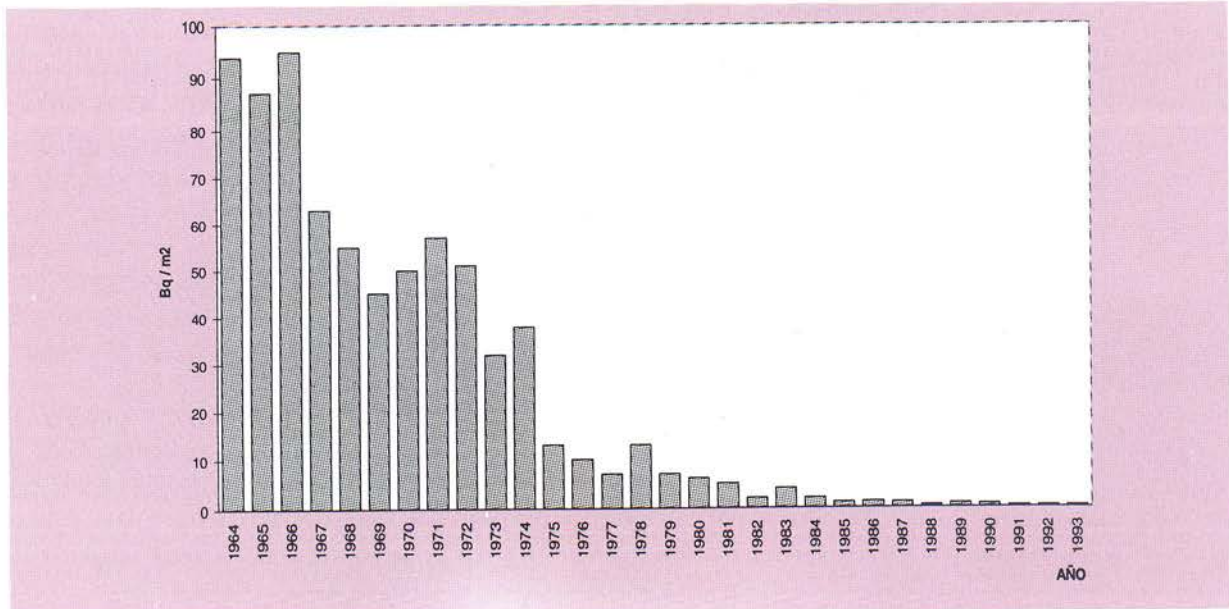


Figura II.4a

DEPÓSITO DE ESTRONCIO 90 EN BUENOS AIRES

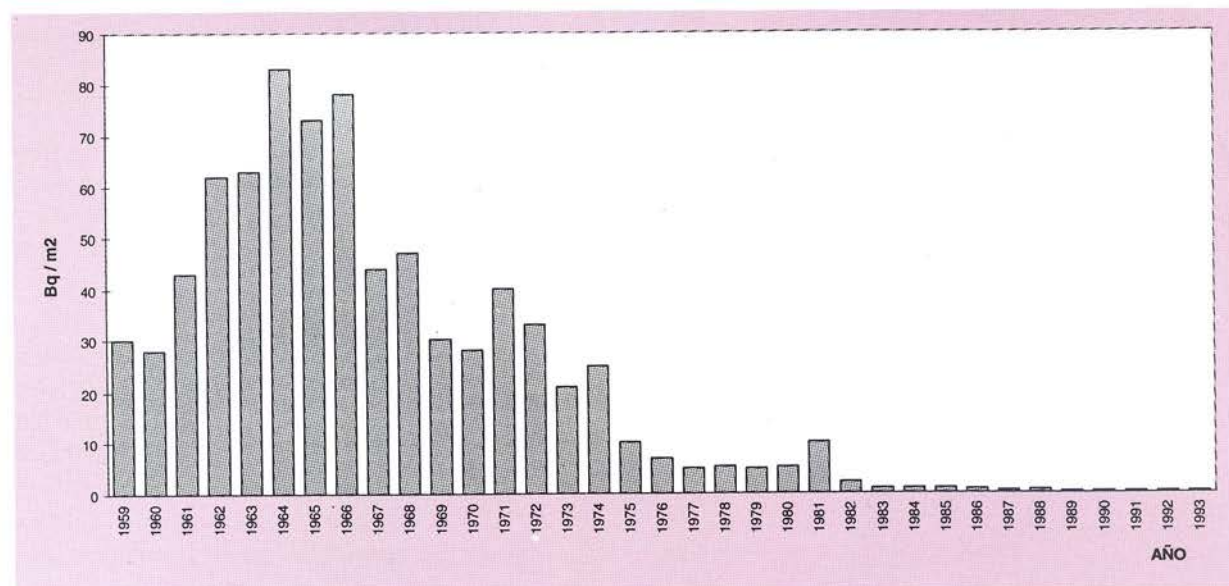


Figura II.4b

CONCENTRACIÓN DE CESIO 137 EN LECHE EN BUENOS AIRES (promedio anual)

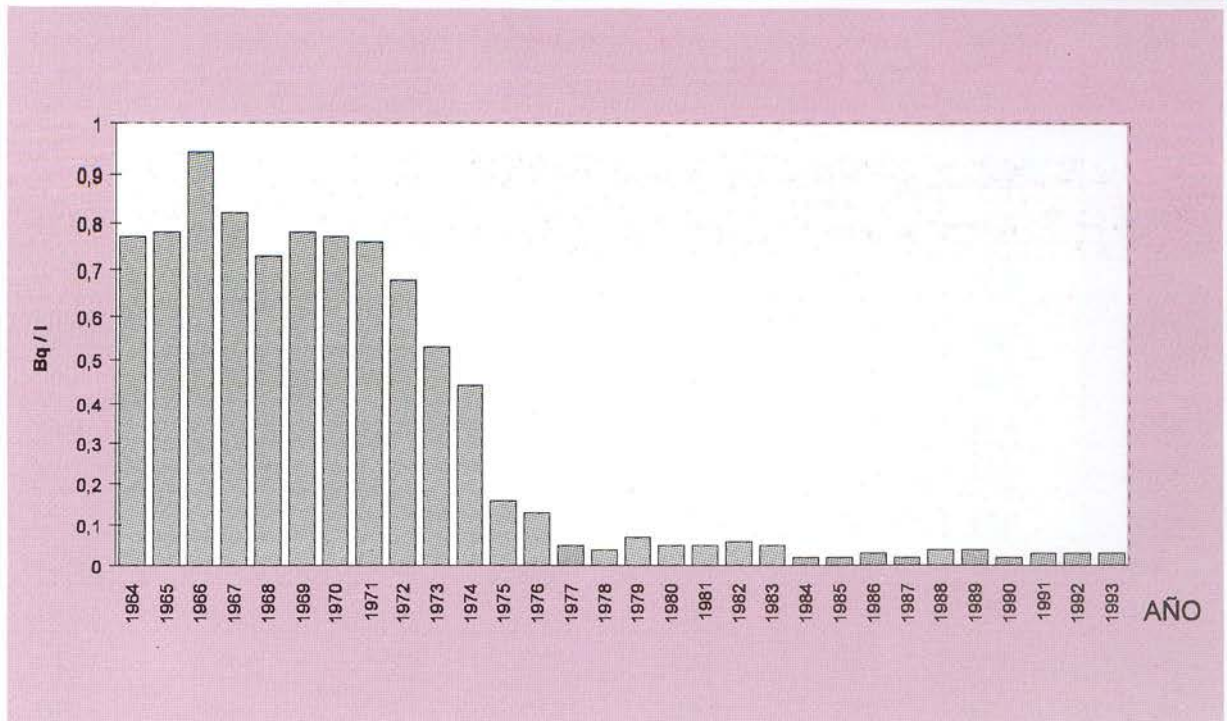


Figura II.5a

CONCENTRACIÓN DE ESTRONCIO 90 EN LECHE EN BUENOS AIRES (promedio anual)

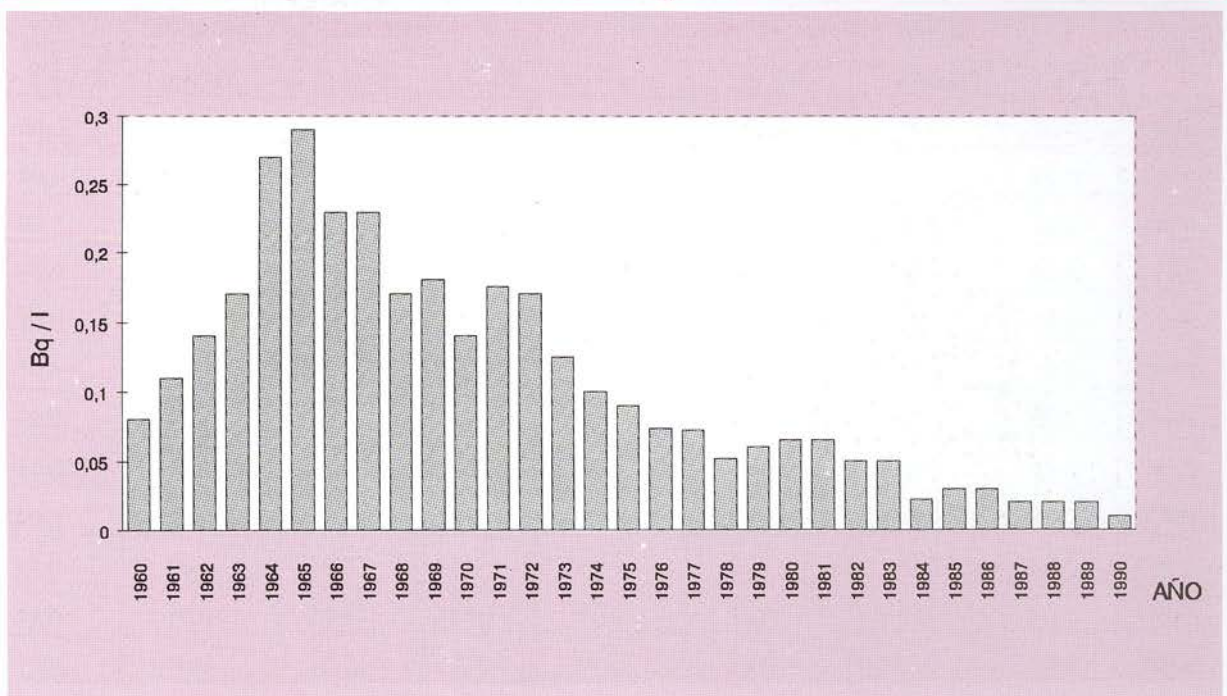


Figura II.5b

TABLA II.5a CONCENTRACIÓN DE ESTRONCIO 90 EN PRODUCTOS ALIMENTICIOS (Promedios anuales)

AÑO	LECHE	DIETA TOTAL (*)	PRODUCTOS LÁCTEOS	CEREALES	FRUTA Y VERDURA DE HOJA	VEGETALES DE RAÍZ	VARIOS (**)
	(Bq/l)	(Bq/d)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
1980	0,06	0,04	0,06	0,05	0,02	0,02	0,04
1981	0,06	0,04	0,06	0,05	0,02	0,02	0,04
1982	0,05	0,04	0,05	0,04	0,01	0,01	0,03
1983	0,05	0,04	0,06	0,05	0,01	0,01	0,04
1984	0,02	0,01	0,02	0,01	<0,01	<0,01	0,01
1985	0,03	0,02	0,03	0,03	<0,01	<0,01	0,02
1986	0,03	0,02	0,03	0,02	<0,01	<0,01	0,02
1987	0,02	0,01	0,02	0,01	<0,01	<0,01	0,01
1988	0,02	0,01	0,02	0,01	<0,01	<0,01	0,01
1989	0,02	0,01	0,02	0,01	<0,01	<0,01	<0,01
1990	0,01	0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

TABLA II.5b CONCENTRACIÓN DE CESIO 137 EN PRODUCTOS ALIMENTICIOS (Promedios anuales)

AÑO	LECHE	DIETA TOTAL(*)	PRODUCTOS LÁCTEOS	CEREALES	FRUTA	VEGETALES DE HOJA	VEGETALES DE RAÍZ	CARNE
	(Bq/l)	(Bq/d)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
1980	0,06	0,05	0,05	0,03	0,02	0,05	0,05	0,05
1981	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,05	0,04	0,05
1982	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,05	0,04	0,05
1983	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,05	0,04	0,05
1984	0,01	0,01	0,01	0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01
1985	0,01	0,01	0,01	0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01
1986	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03
1987	0,01	0,01	0,01	0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01
1988	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,04
1989	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,04
1990	0,01	0,01	0,01	0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01
1991	0,02	0,01	0,01	0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01

(*) Dieta promedio en Argentina

(**) Legumbres, repollo, tomate, chaucha, etc.

II.4.2. ACCIDENTE NUCLEAR DE CHERNOBIL, UCRANIA (1986)

Para el 25 de abril del año 1986 estaba programada la parada anual de la unidad 4 de la central nuclear de Chernobil, a fin de llevar a cabo tareas de mantenimiento. Esta unidad se hallaba equipada con un reactor de 1000 MW(e), tipo RBMK, desarrollado en la ex Unión Soviética. Este tipo de reactores utiliza grafito como moderador, el núcleo está refrigerado con agua común en ebullición, y el combustible es uranio enriquecido al 2%.

También se había programado realizar, antes de detener el funcionamiento de la central, una prueba con uno de los dos turbo-generadores, la cual no afectaría al reactor. Sin embargo, las características intrínsecas del diseño del reactor y el hecho de que los operadores desconectaran intencionalmente varios sistemas de seguridad que hubieran detenido automáticamente el reactor, ocasionó un aumento descontrolado de la potencia (un factor 1000 en 4 segundos), con la consecuente fusión del combustible y la generación de una onda de choque, producida por la evaporación rápida del agua de refrigeración y ocasionada por la interacción del combustible fundido con la misma. Ello rompió el núcleo en pedazos y destruyó la estructura del edificio del reactor, que no era resistente a la presión.

Al quedar expuesto al aire, el grafito del moderador entró en combustión, mientras el material radiactivo se dispersaba en el ambiente. La liberación de radionucleidos se prolongó durante 10 días, y sólo fue detenida mediante el vertido, desde helicópteros, de unas 5000 toneladas de materiales absorbentes sobre el reactor destruido, en tanto se cavaron túneles para realizar el enfriamiento del núcleo con nitrógeno líquido. Posteriormente, todo el edificio del reactor dañado fue encerrado dentro de un edificio de hormigón.

La consecuencia inmediata del accidente fue la muerte de 31 personas, entre operadores de la central nuclear y bomberos. Una de las personas murió como consecuencia de la explosión y 30 fallecieron a causa de la irradiación, con dosis del orden de 16 Gy. El material radiactivo liberado fue la totalidad del inventario de gases nobles del núcleo, unos 2000 PBq, 630 PBq de iodo 131, 70 PBq de cesio 137 y 35 PBq de cesio 134.

Las dosis recibidas por la población local fueron muy inferiores a los niveles que pueden causar efectos inmediatos sobre la salud, estimándose valores individuales de dosis efectiva entre 0,3 y 0,4 Sv para los pobladores que se encontraban en un radio de 30 km en torno a la central. Alrededor de 115 000 personas fueron evacuadas de dicha zona, suspendiéndose las actividades agrícolas para emprender una campaña de descontaminación a gran escala.

Los radionucleidos liberados inicialmente se dispersaron en dirección norte, impulsados por los vientos dominantes; los liberados más tarde lo hicieron principalmente hacia el oeste y el sudoeste. El depósito de material radiactivo en el suelo dependió de las lluvias, en esa época, esporádicas en Europa. La forma en que se depositaron los radionucleidos, la contaminación de los alimentos y la irradiación de individuos fue muy poco homogénea, por lo que se requirió un enfoque regional para calcular las dosis.

II.4.3. GENERACIÓN NUCLEOELÉCTRICA

La contribución de la producción de energía nucleoelectrónica a la exposición del hombre es muy reducida. A fines del año 1993 había en el mundo 424 centrales nucleares funcionando en 30 países. Esas centrales, con una potencia instalada de 30 651 MW(e), producían el 17% de la electricidad mundial. La energía eléctrica total generada por centrales nucleares hasta fines de 1992 fue de aproximadamente 2500 GWa.

En la **Tabla II.6.** se presentan los valores promedios quinquenales de las descargas de radionucleidos al ambiente debidas a centrales nucleoelectrónicas, en el mundo, por unidad de energía eléctrica generada. La dosis efectiva colectiva, por unidad de energía eléctrica generada, fue estimada para el período 1985-1989, en 1,4 Sv hombre/GWa. La dosis efectiva colectiva total, fue estimada en el año 1989, en 275 Sv hombre [3].

TABLA II.6. LIBERACIÓN PROMEDIO MUNDIAL DE RADIONUCLEIDOS POR UNIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA PRODUCIDA, EN TBq / GWa

PERÍODO	GASES NOBLES	TRITIO GASEOSO	CARBONO 14	YODO 131	AEROSOLES	TRITIO LÍQUIDO	OTROS LÍQUIDOS
1970-1974	13 000	48	0,71	0,047	0,019	19	2,10
1975-1979	3300	38	0,70	0,120	0,017	42	0,70
1980-1984	1200	44	0,75	0,009	0,014	38	0,38
1985-1989	330	30	0,52	0,002	0,004	41	0,08

II.5. MEDICIONES EN ARGENTINA

II.5.1. MEDICIONES AMBIENTALES

Más del 99,9% de los radionucleidos que se generan en las centrales nucleares son retenidos en los tubos de Zircaloy

(aleación de circonio) que envainan los elementos combustibles, y sólo la fracción restante es liberada al ambiente, junto con los efluentes gaseosos y líquidos. El monitoreo de esas descargas se realiza mediante mediciones efectuadas en la chimenea de las centrales y en los puntos de descarga de efluentes líquidos de las mismas, antes de su liberación.

La dilución en el ambiente es tan grande que resulta imposible, en el caso de la gran mayoría de los radionucleidos, pretender verificar el cumplimiento de los límites de descarga autorizados a través de la vigilancia radiológica. El plan de vigilancia que se efectúa alrededor de las instalaciones tiene como objetivo verificar que los parámetros de transporte que se han utilizado en los modelos ambientales para el cálculo de los límites de descarga, se mantienen en el tiempo, y detectar cualquier cambio en las vías de transferencia hasta el hombre. Adicionalmente, el plan permite responder a inquietudes de la opinión pública sobre este tema.

En las **Tablas II.7 (a y b) y II.8 (a y b)** se presentan los resultados de las mediciones ambientales llevado a cabo en zonas próximas a la CNA I y a la CNE. Con excepción del tritio, y en casos puntuales del cobalto 60, no se detectó la presencia en el ambiente de radionucleidos atribuibles al funcionamiento de ambas centrales. Los niveles de yodo 131, cesio 137 y estroncio 90 están dentro de los valores observados en las mediciones de la precipitación radiactiva realizadas en el país. Los niveles de cobalto 60 medidos en los alrededores de las centrales citadas han estado cercanos al límite de detección del instrumental utilizado.

TABLA II.7a CONCENTRACIÓN DE ACTIVIDAD EN MUESTRAS AMBIENTALES EN LA ZONA DE LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA I (Depósito, en Bq/m²)

RADIONUCLEIDO		AÑO				
		1989	1990	1991	1992	1993
Cesio 137	(1)	0,4	0,3	0,3	< 0,3	0,2
	(2)	0,4	0,4	0,4	< 0,3	< 0,2
	(3)	0,4	0,4	0,3	0,3	—
Cobalto 60	(1)	0,5	0,4	0,3	< 0,2	< 0,1
	(2)	0,5	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,1
	(3)	0,5	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,1
Iodo 131	(1)	0,4	< 0,2	0,3	< 0,2	0,2
	(2)	0,4	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,1
	(3)	0,4	—	< 0,2	< 0,2	—

PUNTOS DE MUESTREO: (1) Tambo (grupo crítico)
(2) Tranquera acceso a tambo
(3) Ciudad de Lima

TABLA II.7b CONCENTRACIÓN DE ACTIVIDAD EN MUESTRAS AMBIENTALES EN LA ZONA DE LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA I (Aerosoles, en mBq/m³)

RADIONUCLEIDO		AÑO				
		1989	1990	1991	1992	1993
Cesio 137	(1)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	—
	(2)	—	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	(3)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cobalto 60	(1)	0,20	0,12	< 0,10	< 0,05	< 0,05
	(2)	< 0,10	0,13	< 0,10	< 0,05	< 0,05
	(3)	0,11	0,20	< 0,10	< 0,05	< 0,05
Iodo 131	(1)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	(2)	—	0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	(3)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	—
Estroncio 90	(1)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	(2)	< 0,01	0,05	< 0,01	< 0,01	—
	(3)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

TABLA II.8a CONCENTRACIÓN DE ACTIVIDAD EN AGUA DEL RÍO PARANÁ PRÓXIMO AL PUNTO DE DESCARGA DE LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA I, EN Bq/l

AÑO	CESIO 137	COBALTO 60	iodo 131	ESTRONCIO 90
1986	< 0,002	< 0,001	< 0,002	< 0,001
1987	< 0,002	< 0,001	< 0,002	< 0,001
1988	0,007	0,010	0,007	0,002
1989	0,009	0,010	0,009	< 0,001
1990	0,009	0,002	< 0,002	0,002
1991	< 0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001
1992	< 0,002	0,005	< 0,001	< 0,001
1993	< 0,002	0,010	0,004	< 0,001

TABLA II.8b CONCENTRACIÓN DE ACTIVIDAD EN AGUA DEL LAGO EMBALSE RÍO TERCERO PRÓXIMO AL PUNTO DE DESCARGA DE LA CENTRAL NUCLEAR EMBALSE, EN Bq/l

AÑO	CESIO 137	COBALTO 60	iodo 131	ESTRONCIO 90
1986	< 0,01	< 0,02	0,03	< 0,005
1987	< 0,01	< 0,02	< 0,02	0,008
1988	0,02	< 0,02	0,03	0,008
1989	0,02	< 0,02	< 0,02	0,007
1990	0,01	< 0,02	< 0,02	0,006
1991	0,02	< 0,02	0,03	0,007
1992	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,005
1993	< 0,01	< 0,02	< 0,01	< 0,005

En la **Tabla II.9.** se muestran los resultados de las mediciones en agua alrededor del Centro Atómico Ezeiza (CAE). Al igual que en el caso de las centrales nucleares, no se detectaron radionucleidos en el ambiente que puedan atribuirse al funcionamiento de este centro atómico. Incluso, las mediciones de la napa subterránea alrededor del área de tratamiento de residuos de baja actividad, en puntos localizados dentro del CAE, confirma que los radionucleidos quedan fuertemente retenidos en el suelo de las trincheras, no existiendo contaminación alguna de la napa subterránea.

TABLA II.9. CONCENTRACIÓN DE ACTIVIDAD EN AGUA EN LA ZONA DEL CENTRO ATÓMICO EZEIZA EN Bq/l

AÑO		CESIO 137	COBALTO 60	YODO 131
1986	(1)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(2)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(3)			
1987	(1)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(2)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(3)			
1988	(1)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(2)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(3)			
1989	(1)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(2)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(3)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
1990	(1)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(2)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(3)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
1991	(1)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(2)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(3)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
1992	(1)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(2)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(3)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
1993	(1)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(2)	< 0,002	< 0,001	< 0,002
	(3)	< 0,002	< 0,001	< 0,002

(1) Agua del Arroyo Aguirre próximo al punto de descarga

(2) Agua de napa.

(3) Agua de pozo para el suministro de agua potable en el CAE.

II.5.2. MEDICIÓN DE ALIMENTOS

En la **Tabla II.10.** se muestran los valores de concentración de cesio137 en alimentos importados de países europeos, después del accidente de Chernobil. Las concentraciones medidas en tales alimentos no excedieron el 10% para el caso de leche y el 1% para el resto de los alimentos, respecto de los niveles fijados por el Codex Alimentarius para el libre comercio internacional de alimentos.

TABLA II.10. NIVELES DE CESIO 137 EN ALIMENTOS DE IMPORTACIÓN (Después del accidente de Chernobil)

PRODUCTO	ORIGEN	PERÍODO	NIVEL DE CESIO 137 (Bq/kg)
Papas	Polonia	1986	3 a 4
Pollos	Hungría	1986 - 1987	3 a 4
Pollos	ex Yugoslavia	1986 - 1987	3 a 4
Leche en polvo	Finlandia	1991 - 1992	30 a 100
Leche en polvo	Polonia	1991 - 1992	30 a 100
Leche en polvo	Suecia	1991 - 1992	10 a 40
Leche en polvo	ex URSS	1991 - 1992	10 a 50

REFERENCIAS

- [1] Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de la Radiación Atómica. "Fuentes y efectos de las radiaciones ionizantes". Informe a la Asamblea General y anexos, 1977. Naciones Unidas, New York, (1977). 773p.
- [2] Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de la Radiación Atómica. "La radiación ionizante: fuentes, y efectos biológicos". Informe a la Asamblea General y anexos, 1982. Naciones Unidas, New York, (1983). 780p.
- [3] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. "Sources and effects of ionizing radiation". UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York, (1993). 922p.
- [4] Cancio, D., et. al. "Transferencia de algunos nucleidos de interés para las evaluaciones ambientales de instalaciones nucleares". Regional Seminar on the application of environmental impact analysis to the nuclear power industry. Buenos Aires, 29 aug.-2 sep. 1977. CNEA, Buenos Aires (1977). CNEA-NT 26/77.
- [5] Beninson, D., et. al. "Fallout radiactivo debido a las explosiones en el Pacífico Sur en el período 1966-1970". CNEA, Buenos Aires (1972). CNEA-321.
- [6] Beninson, D., et. al. "Fallout radiactivo debido a las explosiones en el Pacífico Sur en el período 1971-1972". CNEA, Buenos Aires (1974). CNEA-376.