

## Chernobil y el medio marino: La repercusión radiológica en contexto

*Los científicos del Laboratorio del OIEA para el Medio Ambiente Marino (IAEA-MEL) en Mónaco han desempeñado una importante función en los estudios posteriores a Chernobil*

por  
Pavel Povinec,  
Scott Fowler  
y Murdoch  
Baxter

**E**l accidente nuclear de Chernobil, ocurrido en abril de 1986, tuvo una repercusión significativa en los medios terrestre y marino. La actividad total de los residuos nucleares liberados fue tan elevada ( $1-2,10^{18}$  bequerelios) que la precipitación radiactiva, ampliamente distribuida después del accidente, fue muy superior realmente a los niveles ambientales antropogénicos de diversas partes del mundo.

Las concentraciones de radionucleidos antropogénicos generalmente varían de una región a otra según la ubicación y magnitud de las distintas fuentes de contaminación. Las precipitaciones radiactivas provocadas por los ensayos nucleares en la atmósfera, en particular las ocurridas durante los decenios de 1950 y 1960, continúan siendo el factor mundial que más contribuye a la radiactividad en los medios marino y terrestre.

No obstante, en algunas regiones, como los mares de Irlanda y del Norte, las descargas (por ejemplo, las provenientes de las plantas de reelaboración en Europa) han influido significativamente en las concentraciones de radionucleidos antropogénicos (por ejemplo, cesio 137 y plutonio 239) en el medio marino. Por otra parte, el mar Báltico y el mar Negro han sido los más afectados por el accidente de Chernobil. En todas estas regiones las tendencias espaciales y temporales observadas en las concentraciones de radionucleidos antropogénicos han sido muy dinámicas. Son consecuencia de la evaluación de los términos fuente y los procesos marinos, incluidos el transporte horizontal y vertical del agua de mar, la sedimentación marina, la resuspensión proveniente de la absorción sedimentaria y biológica y la transferencia a través de la cadena alimentaria.

---

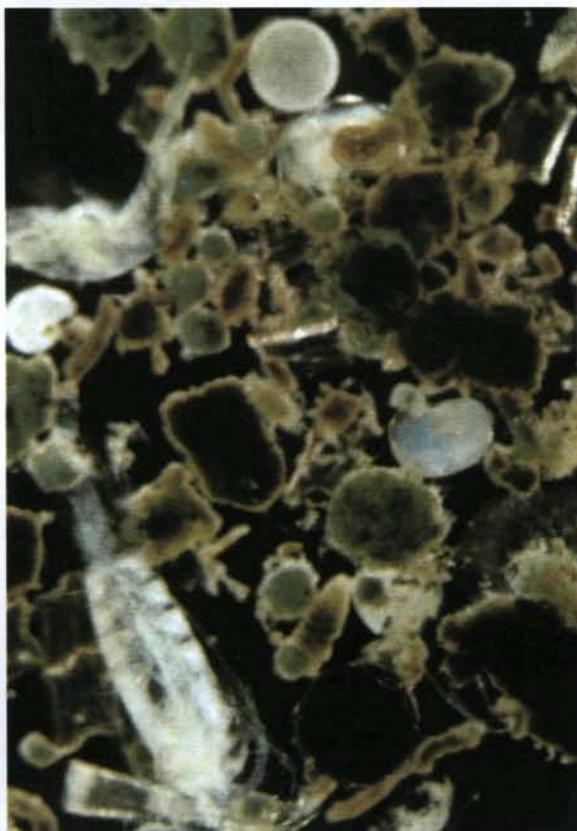
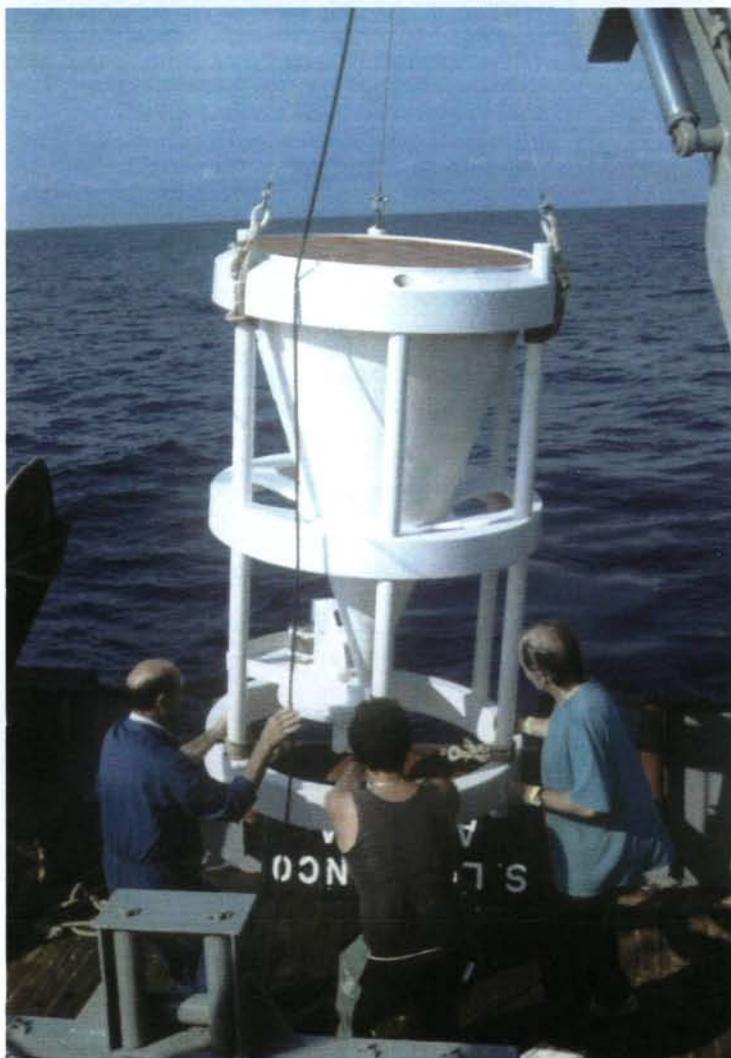
Los Sres. Baxter, Fowler y Povinec son el Director, el Jefe de la Sección de Radioecología y el Jefe de la Sección de Radiometría, respectivamente, del Laboratorio del OIEA para el Medio Ambiente Marino, con sede en Mónaco.

### Estudios con trazadores realizados en el IAEA-MEL

El accidente de Chernobil, sorprendentemente quizá, resultó de gran interés para los oceanógrafos de todo el mundo. La liberación accidental de cantidades apreciables de radiactividad a la atmósfera hizo que se pusiera en marcha un experimento de alcance mundial con trazadores transitorios a una escala que nunca se habría previsto de manera deliberada. Poco después del accidente, los productos de fisión y activación liberados por el incendio penetraron en las aguas de los mares europeos y se integraron a muchos de los ciclos elementales que durante decenios los oceanógrafos han venido tratando de caracterizar utilizando una amplia gama de técnicas convencionales. De repente, inmediatamente después del accidente de Chernobil, se dispuso de una serie de trazadores radiactivos, más bien un tinte colorante, que permitirán seguir el desplazamiento de los elementos a través de los océanos. Los científicos del IAEA-MEL participaron en este interesante y fortuito experimento, colaborando en la vigilancia temporal de los radionucleidos de los ecosistemas de las zonas costera y de alta mar.

Para la labor en alta mar, una de las innovaciones más importantes de los últimos 15 años ocurrida en el campo de la vigilancia del medio marino ha sido la creación de colectores de sedimentos para medir directamente los flujos de materiales asociados a partículas descendentes. Los colectores de sedimentos anclados pueden dejarse sin ser atendidos por ningún personal a cualquier profundidad oceánica para recoger muestras discretas de series cronológicas en intervalos preestablecidos.

Como parte de un estudio conjunto ejecutado a mediados de abril de 1986 por Francia y el OIEA sobre el flujo de partículas en zonas abiertas del Mediterráneo, los científicos del IAEA-MEL, por una feliz coincidencia, anclaron su colector automatizado de sedimentos en serie cronológica a 200 metros de profundidad en el mar de Liguria, entre Mónaco y la isla de Córcega. A fin de estudiar los cambios de la escala cronológica que se operan en el flujo de partículas, se emplazó cada una de las seis cubetas del colector de



Arriba: Como parte de un curso de capacitación del IAEA-MEL ofrecido en Estambul en noviembre de 1994, los científicos toman muestras de sedimentos en el mar de Mármara en la embarcación de la Universidad de Estambul. Izquierda: Un equipo de científicos del IAEA-MEL emplaza un colector de sedimentos igual a los utilizados durante los estudios marinos que se realizaron después de Chernobyl. Derecha: Las partículas típicas recogidas en colectores de sedimentos son las mazas fecales ovaladas, rectangulares y cilíndricas producidas por el zooplancton que se alimenta constantemente de microorganismos. (Cortesía: IAEA-MEL)

sedimentos para tomar muestras de partículas descendentes durante períodos consecutivos de 6,25 días. Después del accidente del 26 de abril, las mediciones atmosféricas realizadas en Mónaco por el IAEA-MEL indicaron que la mayoría de las precipitaciones más intensas provocadas por Chernobil habían penetrado en el mar de Liguria fundamentalmente en forma de un impulso único durante el período comprendido entre el 4 y el 5 de mayo.

El colector de sedimentos fue retirado el 22 de mayo y el material en partículas, junto con otras muestras marinas, se analizaron usando la espectrometría gamma para detectar la radiactividad. Los radioanálisis mostraron que el impulso primario de radionucleidos en partículas llegó a 200 metros de profundidad entre el 8 y el 15 de mayo, es decir, sólo unos siete días después de que la radiactividad máxima se distribuyera por la superficie del mar. El intervalo de tiempo denotó que las partículas radiactivas descendieron a una velocidad media de unos 30 metros diarios. Este impulso de radiactividad que descendió hasta los 200 metros se manifestó sobre todo en el caso de los productos de fisión de partículas de reacción (por ejemplo, los radionucleidos de circonio, niobio y cerio) que no se podían detectar o estaban presentes en cantidades muy pequeñas en la última muestra del colector de sedimentos, recogida después del 15 de mayo.

El rápido descenso de estos radionucleidos en unos pocos días indicó que no descendieron como precipitación radiactiva en partículas, según los modelos de sedimentación stokesianos, sino que, al contrario, formaron grandes agregados que se sabe descienden a velocidades de decenas a cientos de metros diarios.

Sobre la base de anteriores investigaciones de laboratorio realizadas en el IAEA-MEL, se sospechó, cuando ocurrió el accidente, que la actividad biológica en las aguas de la superficie podría haber sido la que absorbiera los radionucleidos como una esponja y los llevara hacia las profundidades. La producción primaria de diminutas células de fitoplancton semejantes a una planta crea superficies sólidas a las que se fijan contaminantes como los radionucleidos. El zooplancton que se alimenta de estas células radiactivas excreta posteriormente grandes agregados (mazas fecales) que pueden seguir recogiendo radiactividad a medida que descienden.

Por consiguiente, para comprobar esta hipótesis, el 6 de mayo de 1986 se recogió con redes zooplancton vivo de las aguas que cubrían el colector de sedimentos y se le permitió que excretara en estanques especiales a bordo de la embarcación. Cuando se analizaron, se comprobó que estas mazas fecales recientemente evacuadas contenían radionucleidos con concentraciones similares y distribuciones relativas como las encontradas en las partículas descendientes recogidas a 200 metros. El examen microscópico de las muestras del colector confirmó que contenían gran cantidad (70% por peso) del mismo tipo de mazas fecales producidas por el zooplancton capturado. Así, este "experimento de campo" accidental constituyó en realidad la primera demostración directa y convincente de los procesos biológicos mediante los cuales las aguas oceánicas se limpian de contaminantes como los radionucleidos.

Tras el accidente de Chernobil, los distintos radionucleidos que penetraron en los mares circundantes fueron eliminados en distinto grado en dependencia de sus reactividades químicas. Por ejemplo, en el caso de los radionucleidos en partículas de reacción, el cerio 141, el cerio 144 y el plutonio 239+240, entre el 50% y el 75% del total de radionucleidos depositados en esta región del Mediterráneo había recorrido 200 metros de profundidad en un mes después del accidente cuando el colector de sedimentos dejó de tomar muestras. En cambio, sólo el 0,2% del correspondiente depósito de cesio 137 había pasado los 200 metros de profundidad en ese momento, observación que concuerda con el comportamiento por lo general no reactivo de este nucleido de período largo en el agua de mar. Por esta razón, el cesio 137 procedente de Chernobil ha resultado ser muy útil como trazador del desplazamiento en masa en las aguas del Mediterráneo y de otros mares durante varios años después del accidente.

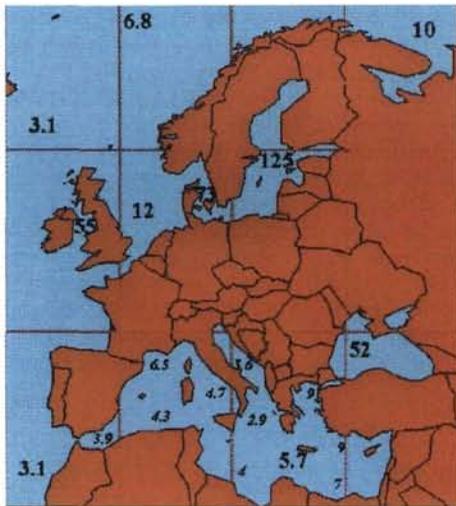
El IAEA-MEL no fue el único grupo de especialistas en ciencias del mar que emplazó colectores de sedimentos en los mares de Europa después del accidente de Chernobil; los colectores colocados en serie cronológica recogieron partículas casi al mismo tiempo en el mar del Norte, el mar Negro y el lago Zurich. En los casos en que se pudieron hacer comparaciones, las concentraciones de radionucleidos procedentes de Chernobil en las distintas partículas descendentes fueron asombrosamente similares, y en la mayoría de los casos, se consideró que la actividad biológica en la columna superior de agua era el factor que determinaba el transporte descendente de la radiactividad. No obstante, se apreciaron grandes diferencias en el flujo de radionucleidos debido a variaciones en el flujo másico de partículas, que suele ocurrir en un lugar y a una profundidad específicos. El caso extremo se observó en el lago Zurich, donde aproximadamente el 20% de la precipitación radiactiva se eliminó de la columna de agua en dos meses a causa del hundimiento de una floración masiva de algas calcáreas.

Analizados en conjunto, los datos sobre el flujo temporal de los radionucleidos de Chernobil reunidos en toda Europa después del accidente han resultado sumamente importantes para perfeccionar los modelos generales de eliminación y transporte de contaminantes en los sistemas acuáticos.

## Aspectos ambientales y radiológicos

De los más de 20 radionucleidos liberados en grandes cantidades durante el accidente de Chernobil, sólo unos cuantos han sido ampliamente estudiados en el medio marino. Entre los más importantes figuran el estroncio 90, el cesio 134, el cesio 137 y el plutonio 239+240. Otros radionucleidos, como el yodo 131, tienen períodos de semidesintegración demasiado cortos para que sean nocivos o conducentes a la comprensión de los procesos marinos, o tenían concentraciones muy bajas (por ejemplo, el yodo 129).

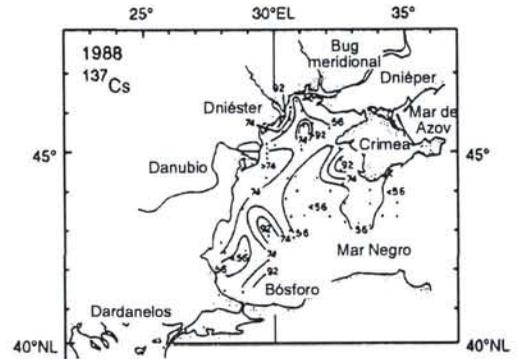
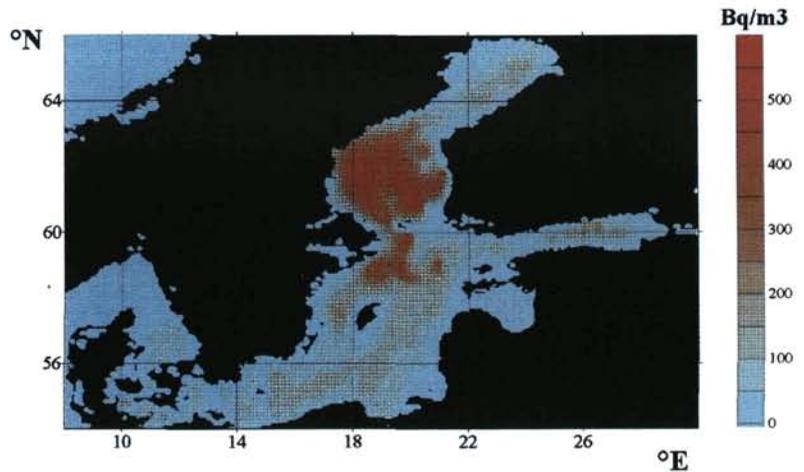
Como ya se indicó, se observaron notables diferencias en el comportamiento marino. El estroncio 90 y el cesio 137 son representantes típicos de elementos



Arriba, izquierda: Actividad media del cesio 137 en el agua de mar de la superficie ( $Bq\ m^{-3}$ ) que se calculó para el año de referencia 1990. Los valores regionales del Mediterráneo se tomaron del informe MARINA-MED de la Comisión de la Comunidad Europea.

Arriba, derecha: Perfiles del cesio 137 en el agua de mar de la superficie del Báltico, correspondientes al período 1986-1988, extraídos de la Base de Datos mundial sobre radiactividad marina del IAEA-MEL. Los datos fueron suministrados, en su mayor parte, por el Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburgo, Alemania.

Derecha: Isogramas de la actividad del cesio 137 ( $Bq\ m^{-3}$ ) en las aguas de la superficie de la zona occidental del mar Negro, extraídos de las mediciones efectuadas en 1988. Adaptado de G.G. Polikarpov y colegas, *Journal of Environmental Radioactivity* (Vol. 13, 1 (1991)).



solubles en el agua de mar y que pueden utilizarse para estudiar la dinámica del agua. Su reactividad en partículas es muy baja en comparación, por ejemplo, con los isótopos de plutonio, los cuales están en el otro extremo, en un grupo de elementos de baja solubilidad y elevada reactividad en partículas. Los isótopos de plutonio no recorren largas distancias desde la fuente porque se depositan en los sedimentos, que, por tanto, contienen la mayor cantidad de éstos en el océano.

Como la entrada del plutonio en los océanos después del accidente de Chernobil fue escasa y localizada, el presente artículo se centrará en el análisis del impacto del radiocesio de Chernobil en el medio marino. De los isótopos liberados, los de cesio fueron los más difundidos y abundantes.

Durante mucho tiempo se ha estudiado el comportamiento del radiocesio en los océanos en relación con la precipitación radiactiva provocada por los ensayos de bombas nucleares y en las descargas provenientes de las plantas nucleares de reelaboración. En particular, las descargas de Sellafield, en el Reino Unido, se han utilizado mucho para estudiar la dinámica del agua y de los sedimentos en el mar de Irlanda, el mar del Norte y el de Noruega. El único radiocesio resultante de las precipitaciones provocadas por los ensayos de armas nucleares fue el cesio 137. No obstante, se ha detectado la presencia del cesio 134 en las descargas de Sellafield y en los residuos de Chernobil. Sin

embargo, las proporciones del cesio 134 respecto del cesio 137 han sido distintas. El cesio de Chernobil, por consiguiente, pudo diferenciarse con facilidad de otras fuentes porque tenía una proporción diferente de la actividad cesio 134/cesio 137 de aproximadamente 1:2.

Desde el punto de vista radiológico, el Báltico fue el mar más afectado por el accidente de Chernobil, debido a que las primeras nubes radiactivas de Chernobil se desplazaron hacia el norte y provocaron una elevada deposición sobre la región escandinava. La deposición atmosférica desempeñó una función fundamental en la determinación de la radiactividad de este mar. La concentración media de cesio 137 en las aguas de la superficie calculada para el año de referencia 1990 era más elevada en el mar Báltico. (Véanse los mapas.) Debido a su condición de zona cerrada y a su escaso intercambio de agua con el mar del Norte, los niveles de cesio 137 de este mar siguen siendo los más altos de Europa.

Los perfiles de cesio 137 que se muestran en el mapa del mar Báltico correspondientes al período de 1986 a 1988 ilustran el incremento de las concentraciones de cesio 137 en el agua de mar, e indican la clara evidencia de las consecuencias de la escorrentía de tierra, en especial de Suecia. El nivel medido en 1986 fluctuó de unos cuantos bequerelios (Bq) a 2400

Bq por metro cúbico, es decir, dos a tres órdenes de magnitud más altos que en otros mares de Europa.

El otro mar más afectado después del accidente de Chernobil fue el mar Negro, donde la concentración media de cesio 137 en el agua de mar en 1990 fue de 52 Bq por metro cúbico, cifra comparable a la del mar de Irlanda. La actividad depositada más alta se observó en 1986 en su región más septentrional, unos 500 Bq por metro cúbico, es decir, 30 veces superior a los valores alcanzados antes del accidente. La actividad del estroncio 90 medida en 1988 en las aguas de la superficie de la zona occidental del mar Negro osciló principalmente entre 10 y 50 Bq por metro cúbico. En 1988, se advirtió también, de una manera general, una distribución similar del cesio 137, pero los niveles de este radionucleido fueron más elevados en un factor de dos. Las concentraciones superficiales de estroncio 90 y cesio 137 en las aguas del mar Egeo fueron mucho más bajas, entre 5 y 11 Bq por metro cúbico. Los regímenes de distribución de estroncio 90 y de cesio 137 que se observaron en las aguas de la superficie del mar Negro se pueden explicar en términos de dos funciones de la fuente principal -a saber, mediante una deposición atmosférica a corto plazo que predominó inmediatamente después del accidente y, a continuación, una transferencia a largo plazo del reservorio de Kiev y de la cuenca hidrográfica de los ríos Dniéper, Dniéster y Danubio.

En el Mediterráneo la aportación principal de Chernobil se produjo después por la vía del intercambio de aguas con el mar Negro, que, en esencia, ha servido de fuente radiactiva. Se estimó que la deposición atmosférica y la aportación fluvial fueron poco importantes. La concentración media de cesio 137 en el agua de la superficie estimada para 1990 fue de 5,7 Bq por metro cúbico. Según las estimaciones del proyecto MARINA-MED de la Comisión de la Comunidad Europea, los niveles de cesio 137 en los mares de la región oscilaron entre 2,9 y 9 Bq por metro cúbico, lo que indica una clara tendencia oeste-este hacia los valores más altos en el mar Egeo.

### Asistencia y capacitación técnicas

El OIEA ha prestado mucha asistencia a los Estados Miembros en la vigilancia y comprensión de los efectos del accidente de Chernobil en sus sistemas marinos. Ante todo, en la región del mar Negro, donde la radiactividad provocada por Chernobil es una de las preocupaciones principales del público en relación con la salud, el OIEA ha emprendido un importante programa de cooperación técnica. Las actividades están encaminadas a fortalecer las capacidades de los Estados Miembros de la región para medir y vigilar la radiactividad marina, en especial los emisores alfa, e incluyen una evaluación y selección meticulosas del equipo y los enfoques de capacitación.

En noviembre de 1994, se celebró en Estambul un curso regional de capacitación de dos semanas de duración sobre la vigilancia de la radiactividad marina. Además, se ha ejecutado un programa coordinado de investigación (PCI) complementario sobre trazadores isotópicos en el mar Negro con el objetivo de aprovechar el impulso de radionucleidos de Cher-

nobil y las técnicas nucleares conexas para entender el desplazamiento de las aguas y el ciclado de los elementos en el muy contaminado sistema marino.

En el mar Báltico, el programa MORS de la Comisión de Helsinki (Vigilancia de las sustancias radiactivas) ha recibido un gran apoyo del IAEA-MEL en la organización de ejercicios de garantía de calidad analítica concebidos específicamente para el análisis de la radiactividad marina. Este apoyo se incrementará además con la organización, en Finlandia, de un curso de capacitación del OIEA sobre estudios de la radiactividad marina que se celebrará en septiembre de 1996. Esta vez también, en los trabajos se hará particular referencia al impacto de Chernobil y a las necesidades de los nuevos Estados bálticos (Estonia, Letonia y Lituania) que han pasado a ser miembros del OIEA.

### Panorama de la radiactividad marina

El recién concluido PCI del OIEA titulado "Fuentes de radiactividad en el medio ambiente marino y sus contribuciones relativas a la evaluación de la dosis general proveniente de la radiactividad marina (MARDOS)" ha permitido tener una visión panorámica de las perspectivas de la radiactividad marina. Este estudio proporcionó nuevas estimaciones actualizadas de las dosis recibidas por el público procedentes del cesio 137 antropogénico (proveniente de precipitaciones radiactivas globales, el accidente de Chernobil y descargas autorizadas) y del polonio 210 natural mediante el consumo de alimentos marinos.

Incluyó un estudio de las zonas de pesca según la definición de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). El análisis de la zona de pesca N.º 37 (en el Mediterráneo y el mar Negro) ha indicado que el compromiso de dosis efectiva colectiva del cesio 137 en los alimentos marinos (pescados y mariscos) en 1990 fue de 6 sievert (Sv)-hombre -muy inferior a los 700 Sv-hombre derivados de la ingestión de polonio 210. Las dosis oceánicas mundiales más altas (86 Sv-hombre) debidas al cesio 137 se hallaron en la zona del Atlántico norte (zona de pesca N.º 27 de la FAO, que también incluye los mares de Irlanda, del Norte, Báltico, de Noruega y de Barentz). No obstante, siguen siendo despreciables en comparación con los 2900 Sv-hombre provenientes de la ingestión de polonio 210.

En términos generales, se puede llegar a la conclusión de que el accidente de Chernobil ha tenido repercusiones medibles en el medio marino. Los niveles de radionucleidos (principalmente de cesio 137) fueron dos a tres órdenes de magnitud superiores a los niveles alcanzados antes del accidente de Chernobil. Sin embargo, se ha calculado que las dosis recibidas por el público debidas a la ingestión de cesio 137 contenido en los alimentos marinos son como mínimo un orden de magnitud inferiores a las debidas al polonio 210 natural.