

Revisión de tema

**CONTAMINACIÓN RADIATIVA AMBIENTAL EN EL NEOTRÓPICO
ENVIRONMENTAL RADIOACTIVE POLLUTION IN NEOTROPIC**

José Manuel Osorez

Laboratorio de Radioecología. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Correo electrónico: josores@ipen.gob.pe

ABSTRACT

Environmental radioactive pollution is produced mainly by the use of natural or artificial radioactive substances, the use of the nuclear power and nuclear weapons, constituting a great danger of contamination for the nature and the humanity; since many residues of these polluting materials have been scattered by all the earth. The risks of the radioactive contamination for the people and the environment depend on the nature of the radioactive contaminant, the pollution level and the extension of the contamination; since all the radiations are genotoxics, the probability of genetic alterations and production of mutations is going to depend on the exposure degree of the cells of an organism. In the last years, the environmental radioactive pollution hazards due to artificial radionuclides were reduced considerably, the scientific community has paid special interest in the contamination with natural radioactive elements like for example the radon released within the underground mines that the probability of occurrence of cancer of lung between the workers and the accumulation of different materials NORMS in mining activities increases, especially in the uranium zones of Pozo de Caldas (Brazil) and Macusani (Peru), zones of phosphoric operation of rocks (Bayovar) or polimetalic mining; the inadequate treatment of these materials is going to produce an important radiological impact and to alter to the habitat of different communities from plants and animals in the region.

Key words: Environmental radioactivity, radon, uranium mining, genotoxicity.

RESÚMEN

La contaminación radiactiva ambiental es producida principalmente por el uso de sustancias radiactivas naturales o artificiales, el uso de la energía nuclear y de armas nucleares, constituyendo un gran peligro de contaminación para la naturaleza y la humanidad; ya que se han esparcido por toda la tierra muchos residuos de estos materiales contaminantes. Los riesgos de la contaminación radiactiva para las personas y el medio ambiente dependen de la naturaleza del contaminante radiactivo, del nivel de contaminación y de la extensión de la contaminación; puesto que todas las radiaciones son genotóxicas, la probabilidad de alteraciones genéticas y producción de mutaciones va a depender del grado de exposición de las células de un organismo. En los últimos años, los riesgos de contaminación radiactiva ambiental debido a radionucleídos artificiales ha disminuido considerablemente, la comunidad científica ha prestado especial interés en la contaminación con elementos radiactivos naturales como por ejemplo el radón liberado dentro de las minas subterráneas que incrementa la probabilidad de ocurrencia de cáncer de pulmón entre los trabajadores y la acumulación de materiales NORM en diferente actividades mineras, especialmente en las zonas uraníferas de Pozo de Caldas (Brasil) y Macusani (Perú), o en zonas de explotación de rocas fosfórica (Bayovar) o minería polimetálica; el inadecuado tratamiento de estos materiales van a producir un impacto radiológico importante y alterar el hábitat de diferentes comunidades de plantas y animales en la región.

Palabras claves: Radiactividad ambiental, radón, minería de uranio, genotoxicidad.

INTRODUCCIÓN

El hombre moderno está expuesto a la radiactividad de muchas maneras, tanto naturales como antropogénicas, por ejemplo, los viajes en avión a elevadas altitudes, la televisión a color y los relojes digitales. Estos ejemplos son bastante comunes y nos indican la estrecha relación del hombre con la radiactividad, sobre todo con la de tipo antropogénico.

La radiactividad puede llegar al hombre también a través de los alimentos, el viento y del agua. Independientemente de que la radiactividad se haya originado por una explosión nuclear de prueba, como resultado de una emisión de vapores radiactivos por un accidente en una planta nuclear o de cualquier otro modo, puede viajar con el viento hasta zonas muy alejadas de la fuente de emisión y descender con los mismos vientos, las lluvias, la nieve o el polvo a la superficie terrestre; una vez ahí, puede pasar a los mantos freáticos, a las corrientes subterráneas o permanecer en el suelo de donde pasa a las plantas, que más tarde consumirán los animales herbívoros, concentrando el material radiactivo en sus tejidos.

Odum (1983) define a la contaminación como el cambio perjudicial en las características físicas, químicas y biológicas de nuestro aire, tierra y agua, que puede afectar o afectará nocivamente la vida humana y la de especies beneficiosas; estos cambios se deben a la incorporación de cualquier sustancia o forma de energía con potencial para provocar daños, irreversibles o no, en el medio receptor. En este sentido, la contaminación radiactiva ambiental se considera como la incorporación de energía ionizante o de elementos radiactivos, llamados radionucleidos, en un componente ambiental determinado (biológico, hidrológico, geológico o atmosférico).

Por otro lado, el Neotrópico es una ecozona terrestre que incluye América del Sur, Centroamérica, y el Caribe. Tiene fauna y flora diferente de la región neártica por su

separación temprana del continente del norte. Esta ecozona incluye Sur y Centroamérica, las tierras bajas mexicanas, las islas caribeñas, y Florida del Sur, porque estas regiones comparten un gran número de plantas y grupos de animales. A veces se usa el término como un sinónimo para el área tropical de América del Sur, aunque la ecozona también incluye la zona templada de América del Sur (Wikipedia 2008).

En la región neotropical, las fuentes de emisiones radiactivas pueden ser naturales o antropogénicas. Las fuentes naturales proceden de las radiaciones cósmicas y en menor medida del sol, además, nuestro planeta, desde su formación, posee materiales radiactivos, especialmente uranio y torio, por ejemplo, el petróleo contiene aproximadamente 1 ppm de ^{238}U y 2 ppm de ^{230}Th . Se calcula que el 68% de la radiactividad total que recibe la tierra es natural. Por otro lado, mediante diferentes técnicas de activación o fisión nuclear, existen alrededor de 65 elementos que el hombre puede volver radiactivos, como por ejemplo, calcio, cobre, cadmio, yodo, níquel, fósforo, azufre, etc. La gran mayoría de estos radionucleidos son utilizados en aplicaciones industriales, agropecuarias y médicas. Uno de los usos más importantes del material radiactivo es la generación de energía en los reactores nucleares, este proceso se basa en una reacción en cadena denominada fisión nuclear en la cual el núcleo del átomo radiactivo se fragmenta; generalmente el elemento utilizado es el ^{235}U ; la mayoría de radionucleidos que se producen al romper un núcleo de ^{235}U son también radiactivos.

En el presente artículo se realiza una revisión de los principales eventos que han originado la liberación de materiales radiactivos o energía ionizante y se discute la necesidad de contar con mecanismos de control a fin de evitar la contaminación del medio ambiente debido al incremento de los niveles de radiactividad natural producto de actividades antropogénicas.

EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Al igual que otros agentes físicos, químicos o biológicos, las radiaciones ionizantes son capaces de producir daños orgánicos, este daño consiste en la transferencia de energía ionizante a las moléculas de las células; como resultado de esta interacción, las funciones de las células pueden deteriorarse de forma temporal o permanente y ocasionar incluso la muerte de las mismas. La gravedad de la lesión depende del tipo de radiación, de la dosis absorbida, de la velocidad de absorción y de la sensibilidad del tejido frente a la radiación. Los efectos de la radiación son los mismos, tanto si ésta procede del exterior, como si procede de un material radiactivo situado en el interior del cuerpo. Cuando la radiación ionizante incide sobre un organismo vivo, la interacción a nivel celular se puede llevar a cabo en las membranas, el citoplasma, y el núcleo.

Si la interacción ocurre en alguna de las membranas se producen alteraciones de permeabilidad, lo que hace que puedan intercambiar fluidos en cantidades mayores que las normales. En ambos casos la célula no muere, pero sus funciones de multiplicación no se llevan a cabo. En el caso en que el daño es generalizado la célula puede morir; en el caso en que la interacción ocurra en el citoplasma, cuya principal sustancia es el agua, al ser ésta ionizada se forman radicales químicamente inestables; algunos de estos radicales tenderán a unirse para formar moléculas de agua y moléculas de hidrógeno (H), las cuales no son nocivas para el citoplasma. Otros se combinan para formar peróxido de hidrógeno (H₂O₂), el cual sí produce alteraciones en el funcionamiento de las células. La situación más crítica se presenta cuando se forma el hidronio (HO), el cual produce envenenamiento. Cuando la radiación ionizante llega hasta el núcleo de la célula, puede producir alteraciones de los genes e inclusive rompimiento de los cromosomas, provocando que cuando la

célula se divida lo haga con características diferentes a la célula original. Esto se conoce como daño genético de la radiación ionizante, que si se lleva a cabo en una célula germinal (espermatozoide u óvulo) podrá manifestarse en individuos de futuras generaciones.

Por lo expuesto, la radiación ionizante puede producir en las células: aumento o disminución de volumen, muerte, un estado latente, y mutaciones genéticas produciendo efectos no solo en individuos particulares sino también en poblaciones comprometidas.

FUENTES DE CONTAMINACIÓN RADIATIVA

Las fuentes de contaminación más importantes en la región neotropical son las siguientes:

Ensayos o pruebas nucleares.

Reactores nucleares y residuos radiactivos.

Accidentes radiológicos.

Minería de uranio.

Radón.

Materiales NORM.

ENSAYOS NUCLEARES

Una prueba o ensayo nuclear es la detonación de un arma nuclear con fines experimentales o de desarrollo de armamento nuclear, entre otros propósitos. Algunas detonaciones han tenido lugar con fines pacíficos. Por ejemplo, cerca de 27 detonaciones se han realizado para cavar pozos o construir canales o puertos artificiales, o bien para extraer combustible o gas subterráneo. Las pruebas nucleares se clasifican como atmosféricas (cuando la explosión tiene lugar dentro de la atmósfera), estratosféricas (en las que el arma nuclear usualmente es transportada en un cohete), subterráneas y submarinas. Las atmosféricas producen una contaminación mayor, mientras en los otros

tipos la lluvia radiactiva es más limitada.

La región neotropical de América del Sur recibió el impacto radiológico de las pruebas nucleares realizadas por Francia en la Polinesia Francesa, así, en el Atolón de Mururoa, desde 1966 hasta 1974 se realizaron 41 pruebas nucleares atmosféricas y, hasta 1995, 137 pruebas subterráneas. Asimismo, entre 1966 y 1996 se hicieron cinco explosiones nucleares atmosféricas y 10 subterráneas a una profundidad de entre 500 y 700 m bajo la laguna en el Atolón de Fangataufa.

Los países más afectados durante los años que se llevaron a cabo las pruebas atmosféricas, debido al transporte de la nube radiactiva, son los países ubicados en la costa del Pacífico Sur. En la Tabla 1 se puede apreciar que las concentraciones de radiactividad en aire en Perú fueron significativamente mayores entre 1966 y 1974 y a partir de ese año los niveles fueron disminuyendo hasta llegar a valores de fondo natural (Zúñiga & Rivera 1987, Osorez 1993). Durante este periodo, los niveles de radiactividad presentes en leche natural de Chile fueron también elevados con una disminución progresiva a partir de la suspensión de las pruebas nucleares atmosféricas por parte de Francia en 1974 (Fig. 1).

La última campaña de ensayos, antes de la firma del tratado de prohibición total de ensayos nucleares, provocó una serie de protestas internacionales y de boicots, sobre todo de países del Pacífico y de organizaciones internacionales, como Greenpeace. Los ensayos fueron abandonados definitivamente el 1996 y substituidos por simulaciones en laboratorio. En la actualidad, el ejército francés tiene un dispositivo de vigilancia de la evolución geológica y radiológica del Atolón de Mururoa y los niveles de radiactividad procedentes de otras latitudes disminuyeron considerablemente.

Tabla 1. Niveles comparativos de radiactividad en aire ($Bq \cdot m^{-3}$).

Año	Perú	Nueva Zelanda	Tahití
1966	49,2	5,2	37,0
1967	32,2	3,0	16,0
1968	67,5	4,4	26,0
1969	4,1	4,4	----
1970	108,9	5,9	11,0
1971	44,4	7,8	24,0
1972	26,3	2,2	0,7
1973	19,2	0,7	13,0
1974	35,2	3,0	1460,0
1975	1,1	1,1	0,7
1976	0,5	0,4	0,1
1977	----	0,3	0,1
1978	0,9	0,3	0,1
1979	0,9	0,3	0,1
1980	----	0,3	0,1
1981	0,8	0,3	0,1
1982	1,5	0,3	0,1

REACTORES NUCLEARES Y RESIDUOS RADIATIVOS

Los radionucleídos tienen actualmente un papel importante en los procesos de producción y generación de energía, especialmente ahora que se ha visto como una alternativa energética para disminuir el calentamiento global debido a fuentes de carbono (Foro Nuclear 2008). Estos radionucleídos aparecen de manera natural en el medio ambiente con diferentes grados de enriquecimiento; sin embargo, desde la mitad del siglo pasado, las iniciativas relacionadas con la energía nuclear fueron creciendo de manera exponencial debido a sus múltiples aplicaciones, y por lo tanto, el riesgo de contaminar el medio ambiente; esta contaminación es generada esencialmente de forma difusa, como son las deposiciones atmosféricas, o puntuales, como es el caso de escapes o fugas de centrales nucleares, o los

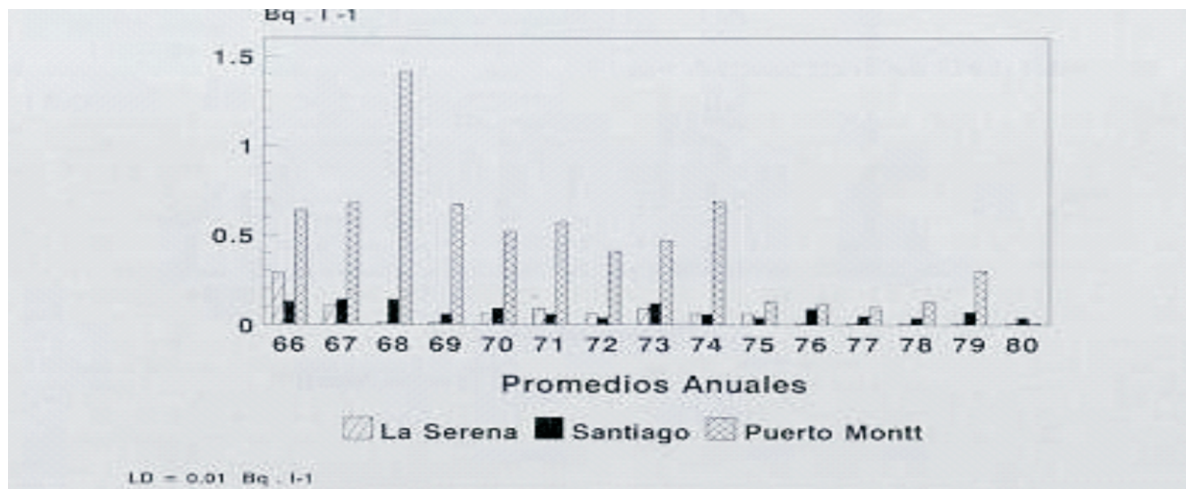


Figura 1. Niveles de radiactividad en leche natural de Chile ($\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$).
Fuente: Comisión Chilena de Energía Nuclear.

depósitos de almacenaje de tales elementos, etc.

Los primeros problemas ambientales generalizados surgieron tras la Segunda Guerra Mundial, mediante pruebas sistemáticas que comenzaron a realizar la mayor parte de los países con potencial nuclear, estas pruebas finalizaron entre los años sesenta y setenta debido al cuestionamiento de que la dispersión de sus contaminantes vía atmosférica podía alcanzar grandes distancias, por cuanto eran inyectadas hasta la estratosfera. Sin embargo los graves problemas ambientales comenzaron a surgir tras accidentes en ciertas centrales nucleares, como la de Chernóbyl, en 1986 (Moysich et al. 2002) lo cual motivó una preocupación mundial sobre el uso de reactores nucleares.

En la región existen dos países que cuentan con reactores de energía nucleoelectrónica, Brasil (Angra I y II) y Argentina (Atucha I y II), estos reactores cuentan con un sofisticado sistema de seguridad que resguarda al medio ambiente de una contaminación radiactiva potencialmente peligrosa. Sin embargo, estos reactores tienen el problema de los residuos radiactivos los cuales son difíciles de eliminar, la búsqueda de

emplazamientos seguros (generalmente en profundidad) para los residuos más persistentes y peligrosos sigue siendo un problema abierto, tanto al debate como a la investigación.

ACCIDENTES RADIOLÓGICOS

Un accidente radiológico es un evento no intencional, previsto aunque inesperado, que involucra radiaciones ionizantes y que puede resultar en daños materiales y/o afectación de la salud de las personas y el medio ambiente. En la región Neotropical, la mayor cantidad de eventos que han producido contaminación radiactiva se deben a accidentes radiológicos por el inadecuado uso de fuentes radiactivas de uso industrial, a continuación se presentan algunos ejemplos.

En la Ciudad de La Plata, Argentina, el 3 de mayo de 1968 se extravió una fuente de ^{137}Cs por una empresa subcontratista que realizaba tareas de gammagrafía industrial. Dicha fuente fue recogida por un obrero, desconociendo que se trataba de una cápsula radiactiva. El objeto se asemejaba, por su forma y dimensión, a un perno de un instrumento, guardándolo el obrero en los

bolsillos de su pantalón de trabajo, luego de examinarlo brevemente en sus manos. Se produjo una severa radiodermatitis exudativa que se extendió desde la zona pelviana hasta las rodillas, comprendiendo además ambas manos. Un área de radionecrosis en piernas comprometió la parte media de ambos miembros, circunstancia que generó la necesidad de amputación de ambas extremidades (Beninson et al. 1969).

En el Perú, durante el año 1977, tres operarios de un equipo de gammagrafía industrial resultaron expuestos a la radiación de una fuente de ^{192}Ir . Al interferir en el normal funcionamiento del equipo, la fuente quedó en exposición fuera de su contenedor durante aproximadamente 2 h. Los operarios presentaron malestar general, anorexia, dolor, eritema, ampollas, ulceración, amputación en partes de dedos y muerte de uno de ellos por causas no bien determinadas (Vizcardo & Espinoza 1991).

El 16 de Diciembre de 1982, en la ciudad de Río de Janeiro, se realizó un asalto a mano armada del vehículo que transportaba una fuente de ^{192}Ir , supuestamente esta fuente fue arrojada al Río Iguazú, a la fecha no ha sido localizada (Lessa & Conceko 1988).

El 23 de septiembre de 1983, en el Centro Atómico Constituyentes, de la Provincia de Buenos Aires, un accidente de inserción rápida de reactividad, se produjo durante el armado de una configuración del conjunto crítico del reactor nuclear. Durante la operación, no se respetó el procedimiento correspondiente, produciéndose en estas circunstancias un pulso de potencia. Como consecuencia, 48 h más tarde, se produjo la muerte por sobre-exposición del operador que realizaba el cambio de configuración, cuyo cuadro clínico permitió determinar la Enfermedad Aguda de Radiación, con Síndrome Neurovegetativo (Gimenez 1988).

Durante 1983, en Ciudad Juárez, México se extrajo una fuente radiactiva de una unidad de teleterapia de ^{60}Co de 1003 curies. Dicha fuente fue retirada de su blindaje principal (cabezal), colocada en una camioneta

pick-up y por curiosidad, fue perforada la cápsula de dicha fuente la cual fue llevada a un depósito de chatarra, y vendida de esa manera, iniciándose la dispersión de gránulos de cobalto. Mientras tanto la camioneta quedó estacionada en la calle produciendo contaminación. Luego, se inició la fabricación de productos de acero con esa chatarra, los cuales fueron exportados a los Estados Unidos como varillas metálicas. Se descubrió la contaminación en el estado de Nueva México, en los Estado Unidos, al pasar casualmente un camión con varillas importadas, frente a la entrada de Los Alamos National Laboratories, donde los detectores instalados indicaron presencia de radiación. Se inició la descontaminación de zonas de Ciudad Juárez y del depósito de chatarra. Se estimó que, como resultado del accidente, aproximadamente 4000 personas habían resultado expuestas a la radiación (Csik 1983).

En Enero de 1987, en el Aeropuerto Internacional de Ezeiza, Argentina, algunos tambores conteniendo concentrado de uranio caen de aproximadamente seis metros, durante una operación de carga de un Boeing 747.

Durante la caída, alrededor del 50% de los 38 contenedores perdieron sus tapas y cierta fracción del material radioactivo, se expandió en un área de 200 m² (Rodríguez et al. 1989).

En Goiania, Brasil, durante el año 1987, una fuente blindada de ^{137}Cs de alta actividad fue removida de su alojamiento protector de una máquina de teleterapia en una clínica abandonada, produciéndose luego la posterior destrucción de la fuente. Los acontecimientos del accidente se iniciaron cuando dos personas se enteraron del abandono de este equipo; se trasladaron al lugar y comenzaron a retirar el montaje giratorio, desarmando la máquina y llevándola en una carretilla hasta la casa de uno de ellos. Se desmanteló el equipo de teleterapia, trasladando sus partes a un depósito de rezago. Desarmaron la fuente que transformaron rápidamente en polvo. De ese modo, muchas personas recibieron altas dosis de radiación

causadas por exposición a la radiación externa y contaminación interna. Cuatro de los individuos fallecieron y veintiocho personas sufrieron quemaduras por radiación. Muchas viviendas y lugares públicos resultaron contaminados, como así también el medio ambiente. La descontaminación requirió la demolición de siete viviendas y varios edificios, así como la remoción de las capas superiores del suelo de grandes zonas (Amaral et al. 1991).

En la ciudad de Arequipa, Perú, un técnico no calificado en mantenimiento de unidades de cobaltoterapia, trató de reparar el mecanismo de movimiento de la fuente y llegó a tocar con la mano la fuente radiactiva de ^{60}Co (79,45 TBq) durante unos instantes. Como resultado el técnico recibió una alta dosis y ocasionó que se le amputaran dos dedos de la mano derecha (Ramírez 1995).

Durante la construcción de una central hidroeléctrica en Yanango, Perú, un soldador que trabajaba en el lugar, recogió accidentalmente, una fuente de ^{192}Ir para operaciones de gammagrafía provocándole irradiación local y de cuerpo entero, con la consecuente amputación de una pierna (IAEA 2000).

Un bulto, conteniendo material radiactivo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) fue robado de un vehículo durante el trayecto cuando era transportado a un hospital en la ciudad de Trujillo, Perú. La búsqueda del mismo se extendió durante dos días sin éxito, y al cabo del tercer día fue dejado en la puerta del hospital sin observarse signos de haber sido abierto (Ramírez 1999).

Un equipo de gammagrafía industrial fue hallado abandonado en la vía pública.

Dicho suceso había sido notificado por una persona del público, quien identificó las señales de advertencia, y puso en alerta a la Autoridad Nacional. Este equipo contenía una fuente de ^{192}Ir cuya actividad era de 11,1 GBq, encontrándose sin condiciones de seguridad. Los niveles de dosis, medidos a un m y en contacto con el equipo eran entre $0,6 \text{ uSv}\cdot\text{h}^{-1}$ y $5 \text{ uSv}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivamente (Ramírez 2000).

MINERÍA DE URANIO

En las décadas del 60 y 70, países como Argentina, Brasil y Perú realizaron estudios a fin de identificar sus potenciales recursos uraníferos que sirvieran para la fabricación de combustible nuclear (Fig. 2), estas investigaciones fueron suspendidas durante más de 30 años y ha resurgido debido a la demanda en la cotización de este elemento, razón por la cual, se están llevando a cabo prospecciones y exploraciones en diversos países de la región. Esta actividad, aparte de los problemas convencionales de la minería como son el drenaje ácido, acumulación de relaves o impactos ambientales negativos, va a generarse el problema de los residuos radiactivos los cuales se van a caracterizar por presentar una alta concentración de radionucleídos producto del decaimiento del U y Th, alta tasa de emisión gamma, altos niveles de exhalación de radón y probabilidad de contaminar el entorno freático de la región.

Expertos internacionales afirman que los impactos negativos pueden minimizarse considerablemente si se aplican adecuadas normas de remediación (Waggitt 2008), sin embargo, la carencia de personal científico y legisladores especializados dificulta la implementación normativa que obligue a las empresas a presentar sus proyectos debidamente sustentados.

RADÓN

El radón es un gas natural radiactivo que surge durante la desintegración del uranio que está presente en la corteza terrestre. El radón se transforma en otros elementos radiactivos los cuales al ser inhalados penetran en las vías respiratorias y las dañan con su radiación. En los trabajadores de las minas de uranio, con altas concentraciones de radón, se ha registrado una alta incidencia del cáncer pulmonar. Este radionucleído es la fuente más importante de exposición ocupacional debido a fuentes naturales en los lugares de trabajo.

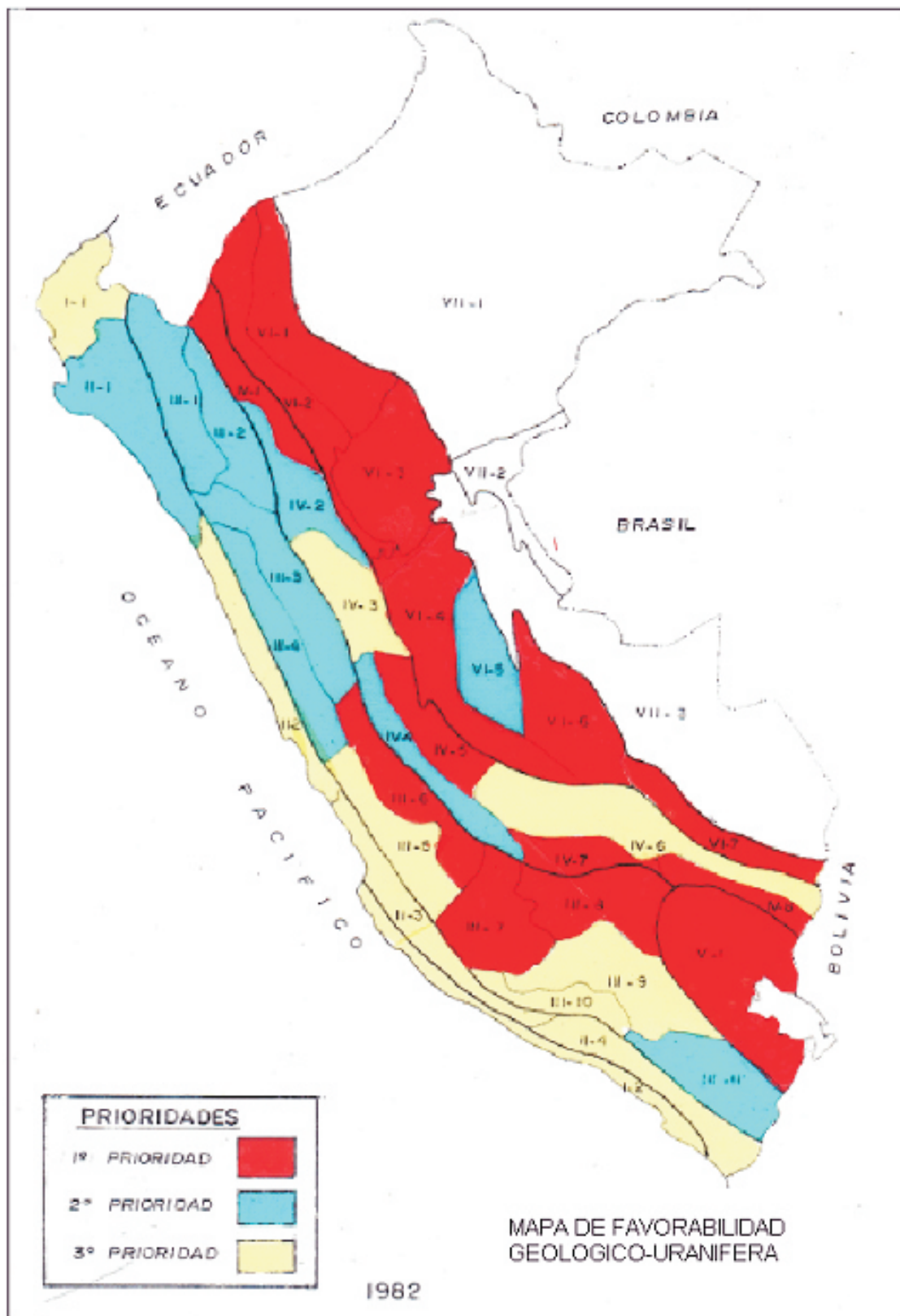


Figura 2. Potencial Uranífero del Perú.
Fuente: IPEN – Perú.

El radón es peligroso porque se degenera rápidamente para producir otros elementos radiactivos persistentes que se alojan permanentemente en los pulmones. Comienza así, un rápido ciclo degenerativo que libera partículas alfa y beta, dentro de los pulmones en cuestión de minutos. El resultado es el daño a las células del pulmón que puede convertirse en cáncer pulmonar. Concentraciones ordinarias de radón en la atmósfera son inevitables y probablemente no hacen ningún daño. El gas se convierte en una seria amenaza cuando grandes concentraciones se acumulan en áreas cerradas de pobre ventilación. Es particularmente dañino a fumadores expuestos a grandes concentraciones del gas. Si bien el Reglamento de Seguridad Radiológica indica los niveles de actuación en caso de exposición crónica a radón para viviendas y puestos de trabajo, aún no se han desarrollado los procedimientos y metodologías para la ejecución del monitoreo y vigilancia epidemiológica de este radionucleído en los trabajadores expuestos de minas subterráneas, razón por la cual se desconoce en la actualidad el grado de magnitud de estas emisiones a nivel nacional (Osores et al. 2003).

MATERIALES NORM

Los materiales radiactivos que se presentan naturalmente y que producen una exposición de radiación a la población se conocen con el acrónimo de NORM (Naturally-Occurring Radioactive Materials). La exposición al NORM se ha incrementado en los últimos años debido al desarrollo de actividades humanas que tienden a concentrar estos elementos radiactivos, así, se tienen la combustión de carbón mineral, el empleo de fertilizantes y la producción de combustibles y gases derivados del petróleo. Además, el radón presente en los hogares es una ocurrencia de NORM el cual ha sido necesario controlar en muchos países de Europa y América del Norte.

El carbón mineral se caracteriza por contener grandes cantidades de ^{40}K , ^{210}Pb y

^{226}Ra , las concentraciones más altas se ha registrado en zonas donde se lleva a cabo la incineración de basura y otros residuos sólidos en donde se utiliza este material como combustible. En algunos países como Brasil, las arenas minerales, principalmente a base de Ti y Zr, presentan una proporción significativa de monazita, un raro mineral terrestre que contiene Th radiactivo, llegando a alcanzar niveles de hasta $400 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

La roca fosfórica utilizada como fertilizante es el mayor NORM que existe en la naturaleza debido a sus altas concentraciones de uranio y torio, en algunos casos, se ha encontrado concentraciones de hasta $10000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ de radiactividad total en muestras de fertilizantes fosfóricos. En la industria petrolera, el ^{226}Ra y ^{210}Pb se depositan a gran escala en tuberías, tanques y equipos de producción llegando a alcanzar los $30000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Los países de la región en su gran mayoría tienen una actividad minera intensiva con la consecuente generación de relaves y aguas ácidas; se ha demostrado que estos residuos presentan grandes cantidades de material radiactivo que debe ser controlado a fin de evitar exposiciones radiactivas innecesarias en la población. Estas fuentes potenciales pueden actuar como bombas químicas temporalmente retardadas en los sitios de almacenaje, por lo que deben ser debidamente monitorizados, ya que pudiera ser que el lugar elegido no fuera el idóneo (sometido a la acción de aguas freáticas, sismos, movimientos de tierras eventuales, etc.), o que la envoltura protectora no fuera la adecuada. Nuevamente el tipo de isótopo y su vida media serán de vital importancia a la hora de tomar las medidas más adecuadas.

CONCLUSIONES

En el pasado los programas de vigilancia radiológica ambiental estuvieron orientados al control de radionucleidos artificiales sin prestar atención a la ocurrencia de elementos radiactivos naturales.

La mayor probabilidad de ocurrencia de una contaminación radiactiva se debe al inadecuado uso de fuentes radiactivas, especialmente las unidades de gammagrafia industrial.

La demanda por combustible nuclear ha originado que muchos países de la región orienten sus esfuerzos a buscar recursos uraníferos. Sin embargo, la mayor parte de explotación de estos recursos se hace a través de concesiones a terceros, el problema es que la gran mayoría de países no cuentan con normativas apropiadas para el control en minas de uranio y menos aun para la evaluación de los planes de remediación, tanto convencional como radiológica. Además, no hay estudios de línea base apropiados en las regiones de exploración y explotación de U.

La población desconoce los riesgos de exposición al radón y a los materiales NORM por lo que no existen normativas que permitan garantizar la salud de la población y el medio ambiente debido a este tipo de contaminación radiactiva de origen natural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaral, E.C.; Vianna, M.E.; Godoy, J.M. & Rochedo, E.R. 1991. Distribution of ^{137}Cs in soils due to the Goiania accident and decisions for remedial action during the recovery phase. *Health Phys.*, 60: 91-98.
- Beninson, D.J.; Placer, A. & Vander-Elst, E. 1969. *Study of a case involving accidental irradiation of a human being*. In IAEA, Handling of Radiation Accidents. Proceedings of a symposium organized by the IAEA in collaboration with the WHO, Vienna, 19-23 May 1969. Vienna: IAEA, 1969. p. 415-429. Proceedings Series. STI/PUB/229.
- Csik, A. 1985. The Juarez accident 1983. *J. Radiol. Prot.*, 5: 38-39.
- Foro Nuclear. 2008. Energía Nuclear y Cambio Climático. Foro de la Industria Nuclear Española. En http://www.foronuclear.org/pdf/Energia_nuclear_cambio_climatico.pdf (leído el 30 de Octubre 2008).
- Gimenez, J.C. 1988. *Evolution of an acute radiation syndrome in a criticality accident*. Seventh International Congress of the International Radiation Protection Association. Australian Radiation Protection Society. Sydney, Australia, 10-17 April 1988. 3: 1154-1156.
- IAEA. 2000. *The radiological accident in Yanango*. International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 41 p.
- Lessa, C. & Conceko, M.A. 1988. *Recuperacao de fontes de Ir-192 durante situacaes de emergencia*. 6^{to}. Seminario de Seguranca industrial. Curitiba, Brasil, 21-24 Junio 1988. 12 p.
- Moysich, K.; Menezes, R. & Michalek, A. 2002. Chernobyl-related ionizing radiation exposure and cancer risk: an epidemiological review. *Lancet Oncol.*, 3: 269-279.
- Odum, E.P. 1983. *The scope of ecology*. In Basic Ecology, cap.1. Saunders College Publishing, Philadelphia.
- Osorez, J.M. 1993. *Environmental Radioactivity in air samples, Peru 1960 – 1992*, II Regional Congress of Nuclear and Radiological Safety. Proc. Cong. Zacatecas, pp. 411-415.
- Osorez, J.M.; Gonzáles, S.; Valencia, J.; Benavente, T.; Martínez, J.; López, E. & Melo, V. 2003. *Estudio Piloto para determinación de los niveles de radón en minas subterráneas*. Informe Técnico. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Lima, Perú. 24 p.
- Ramírez, R. 1995. *Reporte de accidentes en Unidad de Teleterapia*. Informe técnico preparado por la Oficina Técnica de la Autoridad Nacional - IPEN, Lima, 3 p.
- Ramírez, R. 1999. *Incidente de robo de un bulto radiactivo en transporte*. In. Téc. No 081-99-OTAN/GCIS. Lima, IPEN, 2 p.
- Ramírez, R. 2000. *Hallazgo de equipo radiactivo abandonado en vía pública*. Informe N° 197-OO-CINS, Lima, IPEN, 2 p.

- Rodríguez, C.E.; Puntarulo, U. & Cañibano, I.A. 1989. *The yellow cake accident at the Ezeiza Airport*. In International Symposium on Packaging and Transportation of Radioactive Materials. Oak Ridge National Lab., TN., USA. Washington, (USA), 11-16 June 1989. 1: 261-265.
- Vizcardo C. & Espinoza M. 1991. Accidentes radiológicos en el Perú (1977-1988). *Seguridad Radiol. (Argentina)*, 5:168-169.
- Waggitt, P. 2008. *Uranium Mining, Legacy Sites and Remediation – A Global Perspective*. Curso internacional sobre planificación y ejecución de actividades de rehabilitación en el ciclo de producción del uranio. Organismo Internacional de Energía Atómica. Octubre 2008. Buenos Aires, Argentina. 51 p.
- Wikipedia. 2008. *Neotrópico*. En: <http://es.wikipedia.org/wiki/Neotropical> (leído en 25 de Octubre 2008).
- Zúñiga, P. & Rivera, D. 1987. *Radioactivity levels in Peru due to fall out*. Seminary on Radioactive Contamination in the Southeastern Pacific, Santiago, Chile.
- Fecha de recepción: 13 de noviembre del 2008.
Fecha de aceptación: 12 de diciembre del 2008.