

En nuestro planeta, la presencia de material radiactivo siempre ha existido en pequeñas concentraciones naturales. Sin embargo, en el presente siglo estas concentraciones han sido modificadas por procesos artificiales, como las pruebas nucleares que han contribuido con más de 99% del inventario de radionúclidos incorporados al ambiente y por accidentes nucleares ocurridos en varias partes del mundo, que han aportado menos del uno por ciento de dicho inventario. Estos procesos han incorporado nuevos radionúclidos al ambiente, como el caso de ^{137}Cs .

Con el uso de las tecnologías nucleares actuales, el hombre se enfrenta a una nueva contaminación que no existía anteriormente. Por lo anterior, la investigación sobre el comportamiento de los radionúclidos en el ambiente es una prioridad, pero a pesar de los esfuerzos que se han realizado en todo el mundo, es muy poco

lo que se conoce al respecto en los países de las regiones tropicales, incluyendo a México.

EL CESIO 137 Y LOS ECOSISTEMAS

El ^{137}Cs es uno de los radionúclidos más importantes generados por accidentes nucleares. Tiene una vida media de 30.1 años, lo que garantiza una larga permanencia en los lugares donde se deposita. Igualmente, emite radiación gamma de 662 Kev con abundancia del 85% que puede ser detectada fácilmente por los sistemas de medición.

El cesio es un metal alcalino como el potasio, por lo que puede tener un comportamiento metabólico parecido a este elemento. Sin embargo, la forma estable del cesio (^{133}Cs) es poco abundante en la biósfera y la corteza terrestre. El isótopo radiactivo (^{137}Cs) es uno de los produc-

tos más importantes de la fisión nuclear; aproximadamente se generan 6 átomos de ^{137}Cs por 100 fisiones, independientemente de si fue producto de fisión de uranio o de plutonio.

La incorporación de ^{137}Cs a la atmósfera ha sido resultado de las pruebas nucleares en la década de los años sesenta. Los eventos de mayor precipitación radiactiva ocurrieron entre 1962 y 1964 y se ha calculado que la incorporación de ^{137}Cs al ambiente hasta 1980 fue de 9.6×10^{17} Bq, de la cual 76% fue depositada en el Hemisferio norte y el 24% restante en el Hemisferio sur. Posteriormente, después del accidente de Chernobyl en 1986, hubo una nueva emisión de ^{137}Cs estimada entre 4 y 7×10^{16} Bq.

Las principales formas de precipitación son sólidas o líquidas, siendo estas últimas mucho más importantes. Por ejemplo, después del accidente de Chernobyl,



LA CONTAMINACIÓN RADIATIVA EN LOS ECOSISTEMAS

Rafael Martínez Lugo y
Felipe García Oliva

se estimó que la actividad de ^{137}Cs en la lluvia fue 350 veces mayor que la del aire. Una vez que entran los aerosoles radiactivos a la atmósfera, éstos son atraídos a las nubes por un efecto de cambio de presiones en la atmósfera. A este efecto se le conoce como aspiradora. Cuando entran los aerosoles a las nubes algunos crean núcleos higroscópicos (pequeñas partículas sólidas suspendidas en el aire) y sobre ellos se condensa el vapor de agua, por lo que se forma la gota que más tarde se precipitará como lluvia. La actividad de ^{137}Cs en la lluvia depende de las condiciones particulares de cada evento de lluvia.

Después de que entra en la atmósfera, el ^{137}Cs es transportado en el aire y posteriormente se precipita sobre la superficie de la Tierra. La distribución global de la precipitación de ^{137}Cs no es uniforme. Dicha precipitación varía con respecto a la distancia a la que se encuentre de la fuente

atómica inicial, los factores climáticos y la latitud. En el Hemisferio norte, los sitios cercanos al ecuador presentaron mayor precipitación total de ^{137}Cs con respecto a aquéllos cercanos al Polo. A nivel regional, la precipitación de ^{137}Cs depende directamente de la cantidad de lluvia anual y la dirección de los vientos.

El ^{137}Cs que entra al suelo es rápidamente removido de la solución de agua del suelo y fuertemente adsorbido por las superficies de intercambio catiónico (principalmente arcillas y materia orgánica del suelo). Inclusive, en algunos tipos de arcillas como la vermiculita, el ^{137}Cs puede quedar atrapado entre las laminillas de la arcilla, mismo que es liberado hasta que éstas son intemperizadas. Debido a lo anterior, el ^{137}Cs es difícilmente lixiviable (lavado), por lo que se mantiene en las capas superficiales del suelo mucho tiempo después de su precipitación. El largo

tiempo de residencia del radionúclido en el suelo se explica por los siguientes factores (ver figura de recuadro):

1) Fuerte adsorción química en las superficies de intercambio catiónico, sobre todo asociado a las arcillas.

2) Alta inmovilización del ^{137}Cs por las poblaciones de microorganismos del suelo. En trabajos experimentales se ha demostrado que tanto los hongos como las bacterias tiene alta capacidad de retener ^{137}Cs . Una vez que mueren los microorganismos, la biomasa microbiana muerta se descompone por otro grupo de microorganismos, por lo que se mantiene en constante reciclaje dentro del suelo.

3) Absorción de ^{137}Cs por plantas y micorrizas. Las micorrizas son hongos asociados a las raíces de las plantas que le facilitan la toma de nutrientes y agua. Después del accidente de Chernobyl se

DISTRIBUCIÓN DE ^{137}Cs EN EL PERFIL DEL SUELO DE UN ECOSISTEMA TROPICAL

La incorporación artificial de los radionúclidos al ecosistema ha permitido la realización de diferentes tipos de estudios ambientales, como rastrear el movimiento del agua, seguir el flujo de los nutrientes, en las cadenas tróficas, etc. Una aplicación importante ha sido la cuantificación de la erosión del suelo mediante el uso de ^{137}Cs que se ha depositado en el suelo debido a las pruebas nucleares en la atmósfera. Un ejemplo de este tipo de estudio fue llevado a cabo en México por el Instituto de Ecología de la UNAM, y la Comisión de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.

Este estudio consistió en determinar la concentración de ^{137}Cs en muestras de suelos obtenidas en la región de Chamela en la costa de Jalisco. Estas concentraciones se relacionaron con las características físicas y químicas del suelo, así como su localización en el relieve, y con ello se logró calcular las tasas de pérdida de suelos en esta región. Este trabajo ha sido una de las primeras experiencias en la aplicación de esta técnica en regiones tropicales del mundo.

Los datos fueron obtenidos en un ecosistema tropical estacional en la región de Chamela, la cual se encuentra en el municipio de La Huerta, en la costa del estado de Jalisco. La vegetación natural es una selva baja caducifolia, que se caracteriza porque los árboles pierden todas sus hojas al inicio de la temporada de secas. El relieve consiste en lomeríos con marcadas pendientes, formado por tres zonas principales: i) cresta: que es una zona plana y estable, donde el movimiento de suelo casi no existe, ii) ladera: que es una zona inclinada con erosión de suelo y iii) pie: que representa la zona de acumulación del suelo erosionado en la ladera. Actualmente, la selva es transformada en pastizales para la cría de ganado, y esta transformación ha acelerado los procesos de deterioro del ecosistema, como la erosión de suelos, la pérdida de su fertilidad, la pérdida de biodiversidad, etc.

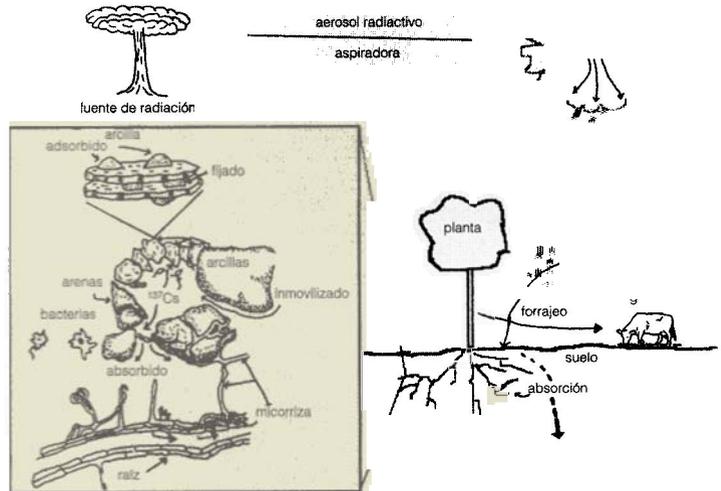
El muestreo de suelos se llevó a cabo en la selva natural en 1990. Los perfiles de suelos consistieron en tomar muestras cada 2 cm hasta una profundidad de 20 cm. A cada una de las muestras se le determinó la actividad de ^{137}Cs por la técnica de espectrometría gamma de bajo fondo.

Los resultados obtenidos de las muestras de la cresta en la selva representan la actividad de ^{137}Cs acumulada que ha sido estabilizada en el suelo hasta la fecha de muestreo (en este caso 1990), porque no ha sido afectada por erosión y deposición.

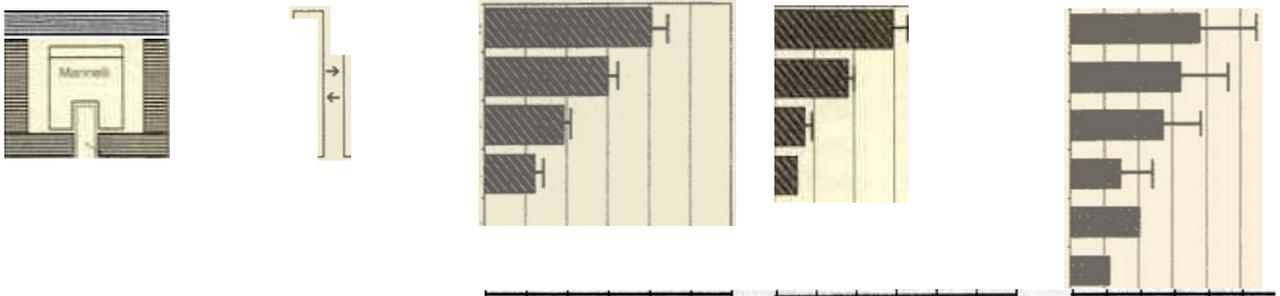
Por lo anterior, la actividad de ^{137}Cs en este sitio representa el nivel base de ^{137}Cs en ese suelo. Para el caso de Chamela fue de $5\,315 \pm 427 \text{ Bq m}^{-2}$. Este nivel base fue mayor que el comparado para suelos de Canadá, Inglaterra y EU, lo que confirma que en zonas tropicales hubo mayor precipitación de ^{137}Cs . Esto ocurrió debido a la circulación mundial de los vientos, que mueven masas de aire de latitudes medias y altas rumbo al ecuador.

El relieve es uno de los factores principales de la erosión de suelo. Debido a que ^{137}Cs se adsorbe a las arcillas, éste es transportado con el suelo. Por lo anterior, cuando hay movimiento de suelo hay pérdidas de ^{137}Cs y ganancias cuando hay depósito. En las laderas se presentó menor actividad ($2\,881 \pm 279 \text{ Bq m}^{-2}$) con respecto a las crestas, y en los pies se tuvo la mayor actividad ($6\,151 \pm 3\,101 \text{ Bq m}^{-2}$). Esta pérdida o ganancia de ^{137}Cs se refleja en la distribución del perfil de suelo. Las laderas tienen una distribución parecida a la de las crestas, pero con menor actividad. En contraste, los pies tienen actividad a mayor profundidad y su patrón de distribución en el perfil no es parecido al de las crestas. Esta distribución se debe a los distintos eventos de depósito, por lo que su distribución no depende directamente de la entrada de ^{137}Cs al suelo.

En este ecosistema los principales factores que favorecerían la persistencia de ^{137}Cs en el suelo son la formación de agregados de suelo y las poblaciones microbianas, que son muy susceptibles de ser perturbadas por la transformación de la selva. Sin embargo, cuando ésta se lleva a cabo, los mecanismos que mantienen el ^{137}Cs en el suelo son destruidos y por lo tanto aumenta la tasa de transferencia a la vegetación. Esta situación es común en los suelos tropicales mexicanos. Por ello, es importante conocer las características del suelo, para poder predecir su capacidad de transferencia de ^{137}Cs .



Comportamiento del ^{137}Cs en el ecosistema.



demonstró que las micorrizas tienen una gran capacidad de absorber y acumular ^{137}Cs en sus cuerpos frutales.

4) Estructura física del suelo. Ésta desempeña un papel muy importante al retener el ^{137}Cs inmovilizado tanto en los microorganismos como en las arcillas. Por lo que la única manera de que se pierda es por medio del movimiento de los agregados del suelo por erosión.

A pesar de que el gran porcentaje del ^{137}Cs es inmovilizado en el suelo, una fracción es absorbida por las plantas, y de esta manera ingresa a la cadena trófica. Los suelos con poca biomasa microbiana o con pocos contenidos de arcillas tienen menor capacidad de retención de ^{137}Cs y por lo tanto existe mayor posibilidad de que el compuesto sea absorbido por las plantas. Esta situación es muy común en suelos de zonas tropicales.

La transferencia de ^{137}Cs a las plantas puede ser por dos vías: depósito directo

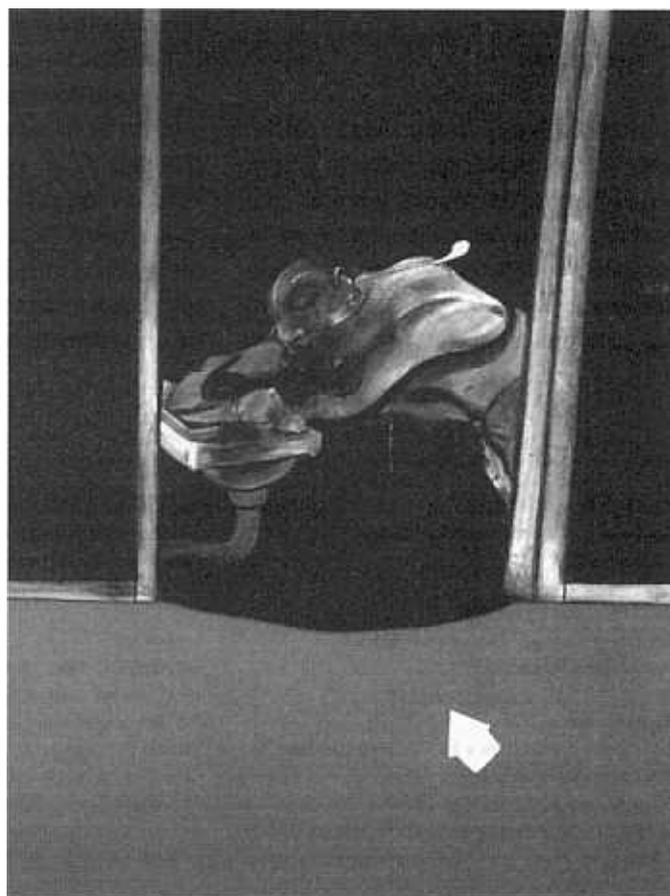
en la superficie de la planta o por absorción de la raíces. Esta última vía depende básicamente de la capacidad de inmovilización que tiene el suelo. La absorción de ^{137}Cs del suelo se incrementa cuando el potasio está poco disponible. Metabólicamente, el ^{137}Cs sustituye al potasio, y por lo tanto, tiene gran movilidad dentro de la planta. El potasio es considerado como uno de los macronutrientes de las plantas, por su importancia en procesos metabólicos, como la fotosíntesis. En estudios realizados en Gran Bretaña después del accidente de Chernobyl se ha encontrado alta concentración de ^{137}Cs en plantas y ovejas.

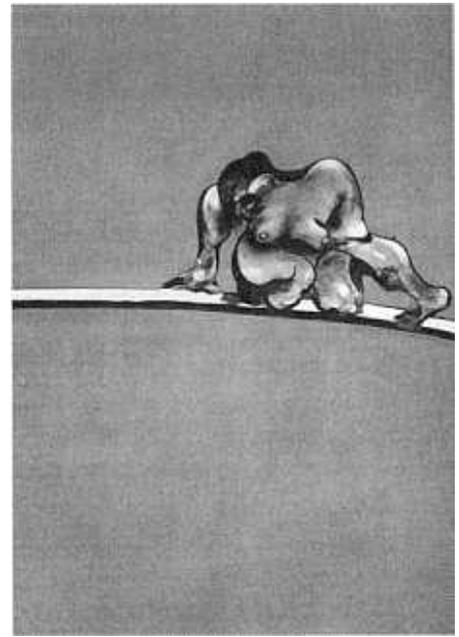
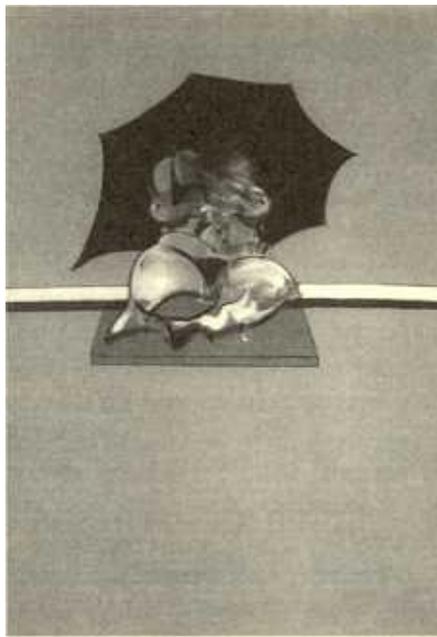
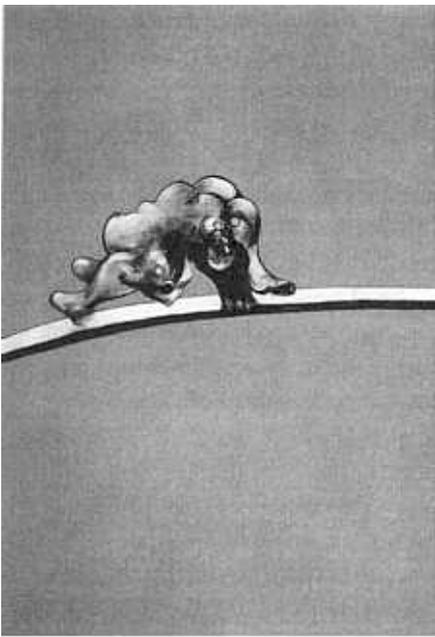
Cuando el ganado consume forraje contaminado con ^{137}Cs , éste se incorpora al tejido de los animales. La leche es uno de los productos más vulnerables a la contaminación con ^{137}Cs , ya que este radionúclido es transferido a la leche en mayor cantidad que el potasio. Se ha estimado que alrededor de 10% de ^{137}Cs ingerido por una vaca es se-

cretado diariamente en la leche, por lo que en 10 días ha secretado 100% del ^{137}Cs ingerido. Cuando existe contaminación radiactiva, la entrada de ^{137}Cs a la dieta humana se lleva a cabo por medio del consumo de cereales, carne y principalmente leche, mientras que los frutos y vegetales aportan cantidades menores.

En el cuerpo humano, los compuestos con cesio son muy solubles en los fluidos corporales. En condiciones experimentales se ha estimado que la absorción intestinal del cesio es de 100%, y en dietas normales es de entre 50 y 80%. El ^{137}Cs migra rápidamente al interior de las células y se acumula principalmente en tejidos suaves. Entre las principales enfermedades que se producen por el ^{137}Cs son diversos tipos de cánceres que atacan a diferentes tejidos.

De todo lo anterior, es posible concluir que la capacidad de transferencia de ^{137}Cs a la dieta humana depende de muchos factores, lo que hace muy complejo su estu-





dio. Pero uno de los elementos claves es el suelo, ya que éste puede reducir drásticamente dicha transferencia, aumentando su capacidad de inmovilización del radionúclido.

CONCLUSIONES

A pesar de que en la actualidad cada vez son más los países que usan la energía atómica, poco se conoce sobre el comportamiento de los radionúclidos en los ecosistemas, de las consecuencias de su incorporación y de las probables alternativas para reducir sus efectos nocivos, ya

sea eliminándolos o aislándolos. Por lo anterior, es importante el desarrollo de estudios que aborden estos problemas. El ^{137}Cs es un buen indicador para este tipo de estudios, debido a su abundancia en las fisiones nucleares y a su larga vida media.

Como se ha mencionado anteriormente, el suelo desempeña un papel muy importante en la reducción de la transferencia del ^{137}Cs al ser humano, ya que una vez que entra en la cadena trófica es sumamente móvil. Para ello, es importante hacer estudios interdisciplinarios donde se comprendan claramente los factores edáficos que determinan la capacidad de trans-

ferencia de ^{137}Cs , así como también los probables mecanismos para poderlo aislar.

Debido a que en México existe una planta nucleoelectrónica en operación (Laguna Verde), el desarrollo de estas investigaciones es importante. Para ello es necesario desarrollar conocimiento y tecnologías aplicables a las condiciones de México y no sólo importar las que han sido generadas en otros países, para condiciones ambientales muy diferentes. En la actualidad, México cuenta con la infraestructura académica y las técnicas de laboratorio necesarias para desarrollar este tipo de estudios. ☪

RAFAEL MARTÍNEZ LUGO

Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias,

FELIPE GARCÍA OLIVA

Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Agradecimientos

Los autores agradecemos a las siguientes personas: Raúl Ortiz Magaña, Ernesto Araico Salazar, Manuel Maass y Sonia Álvarez-Santiago por sus comentarios y apoyo en la elaboración del presente trabajo, a la Estación de Biología Chamela, IB-UNAM, por el apoyo logístico durante el trabajo de campo, a la autoridades y personal de la Comisión

Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias por las facilidades en los análisis por espectrometría gamma. Es importante mencionar que esta investigación fue posible gracias al apoyo económico de DGAPA-UNAM.

Bibliografía

- Bennett, B.G. 1990. "Worldwide radiation exposure from the Chernobyl accident," En: *Environmental Contamination following a Major Nuclear Accident*, vol. 2, IAEA-SM-306 94, Viena, pp 251-260.
- Fredriksson, L., R.J. Garner and R.S. Russell 1966. Caesium-137. En: R.S. Russell (ed.) *Radioactivity and human diet*, Pergamon Press, pp. 317-352.
- García-Oliva, F., R. Martínez y J.M. Maass. 1995. Long-term net soil erosion as determined by ^{137}Cs redistri-

bution in undisturbed and perturbed tropical deciduous forest. *Geoderma* 68 : 135-147.

- García-Oliva, F., R. Martínez y J.M. Maass 1995. Soil ^{137}Cs activity in a tropical deciduous ecosystem under pasture conversion in Mexico. *J. Environ. Radioactivity* 26: 37-49.
- Haselwandter, K., M. Berreck y P. Brunner. 1988. Fungi as bioindicators of radiocaesium contamination: pre- and post-Chernobyl activities. *J. Br. Mycol. Soc.* 90: 171-174.
- NERC. 1993. Radiocaesium in natural systems- a UK coordinated study. *J. Environ. Radioactivity* 18: 133-149.

Pinturas de Francis Bacon: p. 28-29, *Tríptico*, 1983; p. 31, *Tríptico, mayo-junio de 1975* (fragmento); p. 32, *Tríptico estudio del cuerpo humano*