

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE ^{210}Po EN SUELOS AGRÍCOLAS Y
SEDIMENTOS MARINOS DE LOS OCÉANOS ATLÁNTICO Y
PACÍFICO DE GUATEMALA**

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ALFONSO GALILEO GARCÍA VELA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JUNIO DE 1999.

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

DETERMINACIÓN DE ^{210}Po EN SUELOS AGRÍCOLAS Y SEDIMENTOS MARINOS DE LOS OCÉANOS ATLÁNTICO Y PACÍFICO DE GUATEMALA.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química, con fecha ocho de octubre de mil novecientos noventa y ocho.



ALFONSO GALILEO GARCÍA VELA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL 1º.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL 2º.	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
VOCAL 3º.	Ing. Jorge Benjamín Gutiérrez Quintana
VOCAL 4º.	Br. Dimas Alfredo Carranza Barrera
VOCAL 5º.	Br. José Enrique López Barrios
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

**TRIBUNAL QUE PRÁCTICO EL EXAMEN
GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Dr. Adolfo Narciso Gramajo
EXAMINADOR	Ing. Julio A. Rivera Palacios
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

AGRADECIMIENTOS

A:

Lic. Ariel Gutiérrez, un especial agradecimiento por su asesoría y orientación.

Sebastián Hernández, por su colaboración.

La Dirección General de Energía Nuclear del Ministerio de Energía y Minas, por el financiamiento de mi trabajo de investigación.

El personal del Departamento de Contaminación Ambiental de la Dirección General de Energía Nuclear del Ministerio de Energía y Minas.

Inga. Lisyely de León Arana

Ing. Otto Raúl de León

DEDICATORIA

A todos aquellos que les interese conocer como se determina la presencia de un elemento radiactivo natural, específicamente ^{210}Po , en los suelos y sedimentos marinos de los océanos Atlántico y Pacífico de Guatemala, así como la importancia del estudio de los radionucleidos naturales en la economía y ambiente de Guatemala. Espero que mi tesis les sea de utilidad.

A Flor de María

A mis padres:

Elsa Marina Vela Mazariegos

Roberto Alfonso García Ortiz

A María y Diego

A Luis Felipe (q.e.p.d.) y Lidia Ortíz de García (q.e.p.d.)

Guatemala, 27 de noviembre de 1998

Ing. Julio Enrique Chávez Montúfar
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ing. Julio Chávez

Por este medio me permito informarle que una vez revisado el informe final de tesis del estudiante Alfonso Galileo García Vela, titulado **Determinación de ^{210}Po en suelos agrícolas y sedimentos marinos de los océanos Atlántico y Pacífico de Guatemala**, se ha encontrado satisfactorio para su aprobación.

Por lo tanto, solicito que sea autorizado el trabajo mencionado y se proceda con los trámites posteriores a dicha aprobación.

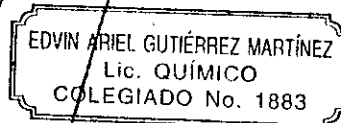
Sin otro particular, me suscribo a usted

Atentamente



Lic. Edwin Ariel Gutiérrez Martínez

Asesor de Tesis





FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 14 de enero de 1,999.

Ingeniero
Otto Raúl de León de Paz
Director Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

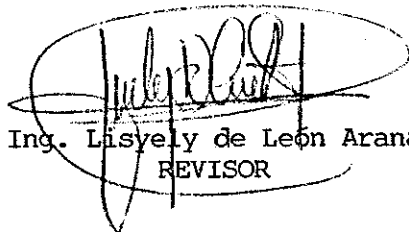
Estimado Ingeniero de León.

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he revisado el Informe Final de Tesis del estudiante Alfonso Galileo García Vela, titulado: **DETERMINACION DE ²¹⁰Po EN SUELOS AGRICOLAS Y SEDIMENTOS MARINOS DE LOS OCEANOS ATLANTICO Y PACIFICO DE GUATEMALA**, dejo constancia de aprobación para proceder a la autorización del respectivo trabajo.

Sin otro particular y agradeciéndolo la atención que se sirva dar a la presente, le saluda.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS




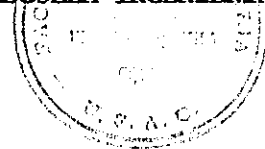
Ing. Lisvely de León Arana
REVISOR



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, Ingeniero Otto Raúl de León de Paz, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de tesis del estudiante **ALFONSO GALILEO GARCIA VELA**, titulado: **DETERMINACION DE Pb-210 EN SUELOS AGRICOLAS Y SEDIMENTOS MARINOS DE LOS OCEANOS ATLANTICO Y PACIFICO DE GUATEMALA**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Raúl de León de Paz
DIRECTOR ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, 15 de febrero de 1,999

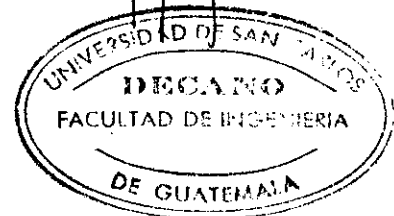


FACULTAD DE INGENIERIA

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: **DETERMINACION DE Po-210 EN SUELOS AGRICOLAS Y SEDIMENTOS MARINOS DE LOS OCEANOS ATLANTICO Y PACIFICO DE GUATEMALA** del estudiante **ALFONSO GALILEO GARCIA VELA**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:


Ing. Herbert René Miranda Barrios
DECANO



Guatemala, 15 de febrero de 1,999.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IV
GLOSARIO	VI
RESUMEN	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. ANTECEDENTES	1
2. METODOLOGÍA	3
2.1 Marco teórico	3
2.1.1 Radiactividad natural	3
2.1.2 Decaimiento	4
2.1.2.1 Decaimiento radiactivo	5
2.1.3 Tipos de radiaciones	6
2.1.4 Tipos de radiación de importancia en la industria	7
2.1.4.1 Partículas alfa	7
2.1.4.2 Partículas beta	7
2.1.4.3 Rayos gamma	8
2.1.5 Energía de radiación	8
2.1.6 Vida media	9
2.1.7 Interacción de las partículas alfa con la materia	10
2.1.8 Radioisótopos empleados como trazadores	11

2.1.9	Polonio	12
2.1.10	Causas de la irradiación	15
2.1.11	Niveles de radiotoxicidad	15
2.1.11.1	Grupo 1. Toxicidad muy alta	16
2.1.11.2	Grupo 2. Toxicidad alta	16
2.1.11.3	Grupo 3. Toxicidad moderada	16
2.1.11.4	Grupo 4. Toxicidad baja	17
2.1.12	Ley para el control, uso y aplicaciones de radioisótopos y radiaciones ionizantes (Ley nuclear) DT. 11-86	17
2.1.13	Efecto biológico de la radiación	18
2.1.14	Protección contra las partículas alfa	20
2.1.15	Determinación de la concentración de actividad alfa	22
2.1.15.1	Concentración de actividad	22
2.1.15.2	Cálculo del error	23
2.1.16	Cálculo de la concentración mínima detectable	24
2.1.17	Desviación estándar	25
2.2	Universo de trabajo	26
2.3	Recursos materiales	27
2.3.1	Reactivos	27
2.3.2	Cristalería y equipo	27
2.4	Procedimiento general	30
2.4.1	Técnica de muestreo	30
2.4.1.1	Suelos cultivados	30
2.4.1.2	Sedimentos marinos	30
2.4.2	Preparación de la muestra	31

2.4.2.1	Tratamiento previo	31
2.4.2.1.1	Suelos	31
2.4.2.1.2	Sedimentos marinos	32
2.4.3	Tratamiento radioquímico	32
2.4.3.1	Suelos y sedimentos marinos	32
2.4.4	Deposición de ^{210}Po	33
2.4.4.1	Suelos y sedimentos marinos	33
2.4.5	Condiciones del sistema electrónico	35
2.4.6	Condiciones previas al conteo alfa	35
2.4.7	Calibración del sistema de medición de espectrometría alfa	37
3.	RESULTADOS	38
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
	CONCLUSIONES	46
	RECOMENDACIONES	47
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
	ANEXOS	51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

No.	Título	Pág.
1	Gráfica concentración de actividad de ^{210}Po en sedimentos marinos de los océanos Atlántico y Pacífico	55
2	Gráfica concentración de actividad de ^{210}Po en suelos agrícolas	56
3	Gráfica espectro de emisión de ^{209}Po y ^{210}Po en la muestra de suelo agrícola del departamento de Baja Verapaz	57
4	Gráfica espectro de emisión de ^{209}Po y ^{210}Po en la muestra de suelo agrícola del departamento de Quetzaltenango	58
5	Gráfica espectro de emisión de ^{209}Po y ^{210}Po en la muestra de suelo agrícola del departamento de Quiché	59
6	Gráfica espectro de emisión de ^{209}Po y ^{210}Po en la muestra de suelo agrícola del departamento de San Marcos	60
7	Gráfica espectro de emisión de ^{209}Po y ^{210}Po en la muestra de sedimento marino de la Bahía de Amatique	61
8	Gráfica espectro de emisión de ^{209}Po y ^{210}Po en la muestra de sedimento marino de Punta de Palma	62
9	Rutas de contaminación por el radionucleido ^{210}Po a los seres humanos	63

TABLAS

No.	Título	Pág.
I	Energías de calibración del sistema de medición de espectrometría alfa	37
II	Concentración de actividad de ^{210}Po en sedimentos marinos del océano Pacífico	38
III	Concentración de actividad de ^{210}Po en sedimentos marinos del océano Atlántico	38
IV	Concentración de actividad de ^{210}Po en suelos agrícolas	39
V	Actividad anual (40 horas/semana) de ^{210}Po en sedimentos marinos del océano Pacífico	40
VI	Actividad anual (40 horas/semana) de ^{210}Po en sedimentos marinos del océano Atlántico	40
VII	Actividad anual (40 horas/semana) de ^{210}Po en suelos agrícolas	41
VIII	Datos originales de los sedimentos marinos de los océanos Atlántico y Pacífico	52
IX	Datos originales de suelos agrícolas	53
X	Limites anuales de incorporación, LAI (Bq) y concentraciones derivadas en aire, CDA (Bq/m^3) (40 horas/semana) para isótopos del polonio	54

GLOSARIO

Radioactividad	Número de transformaciones nucleares (es decir, que afectan al núcleo de los átomos) espontáneas ocurridas en la unidad de tiempo en una fuente radiactiva.
Becquerel	Unidad de la actividad; es la actividad de una cierta cantidad de material radiactivo que sufre una desintegración atómica espontánea cada segundo.
Cadena de desintegración	Serie de radionucleidos en la que cada miembro se transforma en el siguiente mediante desintegración radiactiva, hasta llegar finalmente a un núcleo estable.
Contaminación radiactiva	Presencia indeseable de sustancias radiactivas en seres vivos, objetos o en el medio ambiente.
Choque elástico	Choque de partículas elementales en las que se conserva la energía cinética. En otra escala, puede imaginarse como el choque de dos bolas de billar.

Desintegración

Fenómeno nuclear en el que un átomo radiactivo disminuye su masa y/o su nivel de energía de forma espontánea, lo que se manifiesta en la emisión de radiaciones ionizantes. Las formas más frecuentes de desintegración son la emisión de partículas alfa, partículas beta, captura electrónica y fisión espontánea.

Dosis

Energía radiada por una fuente o transportada por un haz; si se trata de la energía individual de los fotones o partículas se expresa en MeV.

Electrón – voltio

Energía cinética que adquiere un electrón al atravesar en el vacío una diferencia de potencial de un voltio. Un electrón – voltio (eV) equivale a 1.602×10^{-19} julios.

Exposición

Efecto de someter o someterse a las radiaciones ionizantes.

Fondo radiactivo natural

Conjunto de radiaciones ionizantes que existen en el medio ambiente de forma natural y que provienen de fuentes cósmicas o radiactivas terrestres.

Fuente de radiación	Aparato o sustancia capaz de emitir radiaciones ionizantes.
Incorporación	Fenómeno por el cual una sustancia radiactiva existente en el medio exterior, pasa a formar parte del cuerpo humano por inhalación, ingestión, a través de la piel, etc.
Isótopo	Cada uno de los distintos nucleidos que tienen el mismo número atómico (número de protones) y, por tanto, pertenecen al mismo elemento químico, pero que difieren entre sí en el número de neutrones.
Limites anuales de dosis	Valores máximos, referidos siempre a los 12 últimos meses, de las dosis que pueden ser recibidas por los trabajadores profesionalmente expuestos y los miembros del público.
Límites anuales de incorporación (LAI)	Actividad que, introducida en el organismo de un individuo dado ocasiona una dosis interna integrada igual al límite de dosis anual establecida.
Nucleido	Especie atómica caracterizada por el número de protones y de neutrones que posee.

Partícula alfa	Núcleo de Helio – 4 emitido en el transcurso de una desintegración nuclear. Por extensión, toda agrupación de dos protones y dos neutrones.
Partícula beta	Electrón, positivo o negativo, emitido en la desintegración de un núcleo atómico.
Periodo de semidesintegración	Intervalo de tiempo necesario para que el número de átomos de un nucleido radiactivo se reduzca a la mitad por desintegración espontánea.
Radiaciones ionizantes	Nombre genérico empleado para designar las radiaciones de naturaleza corpuscular o electromagnética que en su interacción con la materia producen iones, ya sea de forma directa o indirectamente.
Radionucleido	Nucleido radiactivo.
Radiotoxicidad	Toxicidad debida a las radiaciones ionizantes emitidas por un radionucleido incorporado al organismo y por sus productos resultantes. La radiotoxicidad no sólo depende de las características radiactivas del radionucleido, sino también de su estado físico y químico así como del metabolismo de ese elemento en el organismo.

Radioisótopo	Isótopo radiactivo.
Rayos gamma	Radiación electromagnética producida en el fenómeno de desintegración radiactiva. Su longitud de onda es menor que la de los rayos X, por lo que es una radiación extraordinariamente penetrante.
Reacción nuclear	Reacción entre partículas en la que las fuerzas que intervienen son de origen nuclear.
Serie radiactiva	Cadena de radionucleidos en las que cada miembro se transforma en el siguiente mediante desintegración radiactiva, hasta llegar finalmente a un nucleido estable.
Sustancia radiactiva	Cualquier material que contiene uno o varios radionucleidos cuya actividad deba tenerse en cuenta con fines de protección radiológica.
Vida media	Media aritmética de la vida de una especie atómica en un estado determinado.

RESUMEN

Esta tesis es de tipo experimental estudia la actividad por emisión de partículas alfa del radionucleido natural ^{210}Po en suelos de uso agrícola de diferentes regiones del y país y sedimentos marinos del océanos Atlántico y Pacífico de Guatemala.

El método que se utilizó en este trabajo de investigación para la extracción de ^{210}Po es un método radioquímico. El método para la extracción de ^{210}Po de las muestras de suelo agrícola y sedimentos marinos de los océanos Atlántico y Pacífico de Guatemala se aplicó, con una mezcla de ácidos fuertes, que conlleva la separación de otros metales interferentes. Luego de obtener la solución de polonio se llevó acabo la deposición de este metal radiactivo sobre discos de cinc para formar una fuente radiactiva homogénea que permite la medición de la radiación de emisiones alfa debidas a este elemento en particular, en un sistema de espectrometría alfa instalado con un detector de iones implantados de silicio planar PIPS.

Las muestras se recolectaron en suelos cultivados con productos agrícolas de importancia agroindustrial como café, cardamomo, caña de azúcar y maíz de 8 departamentos de la república; así como sedimentos marinos de 6 diferentes lugares de los océanos Atlántico y Pacífico de Guatemala, en cuyas

aguas se lleva a cabo una importante actividad pesquera, fueron los parámetros de medición adecuados para la extracción del radionucleidos ^{210}Po que permitió evaluar la concentración de actividad (Bq/Kg) y la actividad anual (Bq) de los niveles de radiación de ^{210}Po en el entorno ecológico donde se desarrollan actividades agrícolas y pesqueras de relevancia ambiental y económica para Guatemala.

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación demuestran la existencia de contaminación radiactiva por el radioisótopo natural ^{210}Po en los suelos agrícolas y sedimentos marinos de los océanos Atlántico y Pacífico de Guatemala. Se determinó que los valores más altos de concentración de ^{210}Po encontrados en las muestras analizadas corresponden a los sedimentos marinos.

La concentración de actividad de ^{210}Po en suelos agrícolas y sedimentos marinos son menores a los límites anuales de incorporación máximos permisibles.

INTRODUCCIÓN

Radionucleidos de polonio de corta vida media y larga vida media están presentes en el medio ambiente en concentraciones apreciables como resultado de la desintegración natural de radioisótopos de la serie del uranio. De estos radionucleidos, el isótopo ^{210}Po con vida media de 138.4 años es de particular interés en la medición de dosis de radiación total de ingestión e inhalación en los seres humanos, debido a que áreas específicas lo contiene en altas concentraciones, y el riesgo a la salud humana por la relación con la agroindustria e industria pecuaria de consumo interno y de exportación, conlleva a mantener controles de niveles de radiación aceptables para la salud humana.

En esta tesis se aplicó un método radioquímico que involucra la separación química de otros metales interferentes y la deposición de ^{210}Po de muestras de suelo de áreas agrícolas y sedimentos marinos de los océanos del país que permitirá medir la actividad por polonio mediante espectrometría alfa.

Este trabajo de tesis se basó en la siguiente hipótesis: en los suelos cultivados y los sedimentos marinos de los océanos de Guatemala, existe contaminación radiactiva por el radioisótopo natural ^{210}Po emisor de radiación alfa, cuantificable por espectrometría alfa.

El comportamiento químico – biológico de este radionucleido natural puede al ingerirse o inhalarse dañar seriamente los tejidos o las células del cuerpo humano debido a la emisión de partículas alfa la cual tiene un alto poder de ionización. Considerando en forma inherente un riesgo potencial para la salud, se hace necesario el control de los niveles de radiación, por ello es esencial contar con un método que permita la evaluación de la actividad de los radionucleidos naturales, en este caso en el suelo de distintas regiones agrícolas y sedimentos marinos por su relación con la cadena alimenticia y por lo tanto, con la agroindustria y la industria pecuaria de consumo nacional y de exportación.

La exportación de productos agroindustriales a la Comunidad Europea y países igualmente desarrollados requieren de un certificado radiosanitario para realizar la comercialización de dichos productos de ahí que el estudio de la concentración de radiactividad total de radionucleidos naturales y artificiales es de interés económico y ambiental.

1. ANTECEDENTES

El primer trabajo importante en el campo de la radiactividad lo realizó María Curie quien descubrió el polonio en 1898 obteniéndolo a partir de la peblenda, que contiene menos de 0.1 mg de polonio por tonelada.²

Actualmente, se lleva acabo en muchos países un control sistemático de los niveles de radiación natural y artificial.

O. Iacob, E. Botezatu, C. Grecea, C Diaconescu y I. Clain del Instituto de salud e investigación medica en Rumania publicaron en 1994 un estudio de la exposición a la radiación, en orden de los radionucleidos más dañinos a los seres humanos al ser ingeridos o inhalados, para la investigación se utilizó diferentes tipos de suelos, se determinó entre los elementos radioactivos encontrados que el ^{210}Po era uno de los más peligrosos.³

Los físicos A. Martínez y M. García de la Universidad de Sevilla España, llevaron a cabo en 1997, un estudio de investigación y análisis de suelos y dos especies de plantas (*Spartina densiflora* y *Spartina maritima*) pertenecientes a las orillas de un río, mediante extracción de ^{210}Po y ^{238}U . En este estudio obtuvieron altas concentraciones de radiactividad debido al impacto ambiental de una industria de fertilizantes.⁴

R.T. Saito y I. Cunha del Instituto nuclear, área de supervisión nuclear, Sao Paulo Brasil, publicaron en 1997 un método para determinar ^{210}Po en muestras marinas por digestión y deposición en discos de plata y medibles por espectrometría alfa. Se determinó a partir del trazador de ^{208}Po los niveles de radiación por ^{210}Po en sedimentos marinos en las costas de Brasil de la región antártica, con un valor de 10mBq/kg. ⁵

R.G. Ditchburn , N.E. Whitehead y K. Kim del Instituto de geología y ciencias nucleares de Nueva Zelanda, publicaron en 1997 un trabajo sobre un análisis de muestras de sedimentos marinos de los lagos de Waihola para determinar ^{210}Pb por medio de su radionucleido hija ^{210}Po . Se obtuvo como resultado bajas concentraciones de ^{210}Pb en comparación con otros lugares cerca de esta área de Nueva Zelanda. ⁶

R.V. Bogdanov y T.O. Gribanova de la Universidad de San Petesburgo Rusia, publicaron en 1996 un estudio sobre la composición y concentración en muestras de suelo de la industria metalúrgica en Sillamjæe, Rusia. Tomaron muestras de suelo de tres diferentes áreas de producción. Los resultados fueron obtenidos por un método radioquímico y medidos por espectrometría alfa, se obtuvo como resultado que los radionucleidos torio-230 y radio-226 de corta vida media, siendo el polonio-210 su producto de decaimiento, este constituía casi toda la actividad radiactiva de la región. ⁷

2. METODOLOGÍA

2.1 Marco teórico

2.1.1 Radiactividad natural

La radiactividad estudia los procesos de desintegración espontánea de los núcleos, en forma gradual hasta alcanzar el estado estable y se caracteriza por:

- Tipo de radiación emitida
- Energía de la radiación

Las fuentes principales de radiación natural son:

- Externas: rayos cósmicos y rayos gamma terrestres.
- Internas: isótopos generados por los rayos cósmicos e isótopos de radón (^{220}Rn y ^{222}Rn) presentes en el suelo y los materiales de construcción.

Los núcleos radiactivos naturales, emiten generalmente partículas alfa y beta en una serie de transmutaciones.

2.1.2 Decaimiento

La primera evidencia de la radiactividad natural fue proporcionada por Henry Becquerel en 1896, cuando demostró que el mineral de uranio podía oscurecer una placa fotográfica en igual forma como lo hacían los rayos X, descubiertos un año antes por Willheem C. Rontgen.

En 1898 María Sklodowska en su trabajo de tesis doctoral, señala que el torio tiene una actividad similar a la del uranio. Más tarde en colaboración con su esposo, Pedro Curie, comprueban que ciertos minerales de uranio son mucho más activos de lo que les corresponde de acuerdo a la cantidad de uranio que contienen por lo tanto, comprendieron que esos minerales había más elementos desconocidos que eran más radiactivos que el uranio.

Después de varios análisis químicos, Pedro y María Curie a aislar dos elementos nuevos, poderosamente radiactivos a los que denominan polonio y radio.

A partir de entonces y después de largas y complicadas investigaciones a las cuales contribuyeron muchos científicos de renombre, se lograron mayores conocimientos de la radiactividad natural y en el año de 1903 los experimentos de Rutherford demostraron la existencia de tres clases de emisiones radiactivas: alfa, beta, gamma.

2.1.2.1 Decaimiento radiactivo

El proceso de desintegración radiactivo es un fenómeno que no se ve afectado por ningún agente físico o químico (como presión, temperatura, combinación, etc.) y se produce a una velocidad fija, característica de cada radionucleido. El resultado de la desintegración continua, es una disminución de la actividad del material radiactivo.

La unidad de radiación más conocida y empleada es el Curie, que ha sido definido como 37,000 millones de desintegraciones por segundo, independientemente de la fuente o características de la radiactividad. En la actualidad un Curie significa, simplemente, que una muestra de cualquier material ocurren 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo.

El Curie como unidad se originó de las emisiones de un gramo de radio, por lo tanto, un gramo del radio tiene una actividad de un Curie. Es importante señalar que cuando se aplica a radionucleidos distintos al radio, la unidad Curie no indica la masa del material. Y el número de Curies por gramo se le ha denominado actividad específica.

En la actualidad se encuentra otra unidad de actividad llamada Becquerel (Bq), que tiende a sustituir al Curie.

1 Becquerel (Bq) = 1 desintegración/segundo

1 Curie (Ci) = 37×10^9 Bq = 37 G Bq

La actividad de una muestra depende tanto de la cantidad de núclidos susceptibles a desintegrarse, como de la probabilidad de que un núcleo se desintegre. Esta probabilidad se expresa mediante la constante de desintegración λ (seg^{-1}) que representa la fracción del número total de átomos presentes que se desintegran por unidad de tiempo. Por lo tanto, el número de desintegraciones por unidad de tiempo en una muestra dada, es el producto del número total de átomos presentes en la muestra (N), por la fracción de estas desintegraciones por unidad de tiempo.

2.1.3 Tipos de radiaciones

El término radiación tiene un sentido muy amplio y aunque abarca emisiones como la luz y las ondas de radio, se suele emplear por lo general para designar a la radiación ionizante; es decir, lo que puede liberar electrones de la materia y producir partículas cargadas (iones).

Durante el proceso de desintegración del núcleo, se producen diferentes clases de emisiones radiactivas como: partículas alfa, partículas beta, rayos gamma, positrones, captura K, conversión interna, etc., sin embargo, en aplicación industrial interesan principalmente los siguientes tipos de radiación: alfa, beta y gamma.

2.1.4 Tipos de radiación de importancia en la industria

2.1.4.1 Partículas alfa

Consisten en partículas constituidas por dos protones y dos neutrones. Poseen una carga positiva, exactamente el doble que la del electrón. Por esta razón, una partícula alfa y el núcleo de helio son idénticos en estructura, en otras palabras son la misma partícula.

El poder de penetración de las partículas alfa es tan bajo, que pueden ser detenidas por completo por unos centímetros de aire, una delgada hoja de papel y no penetran más allá de la superficie de la piel.

2.1.4.2 Partículas beta

Son partículas cargadas negativamente. Tienen la misma masa y carga que el electrón y son pues electrones que se trasladan a grandes velocidades. Estas partículas se originan dentro del núcleo. Si en el núcleo únicamente existen protones y neutrones, ¿cómo es posible que de él salgan electrones? Para explicar este hecho se debe tener en cuenta que en los núcleos en que no hay un balance adecuado de protones o de neutrones, tales núcleos tienden a estabilizarse trasmutando núcleos para lograr el balance. En el proceso de emisión de partículas beta, uno de los neutrones se transforma en protón emitiendo una partícula beta, reduciéndose así la proporción neutrón – protón. Su penetración es mayor que la de las partículas alfa, pues pueden penetrar de

uno a dos centímetros en el tejido humano y se necesitan unos milímetros de espesor en aluminio para detenerlas completamente. La actividad beta se espera cuando la proporción neutrón – protón es alta.

2.1.4.3 Rayos gamma

Es una clase de radiación electromagnética similar a las ondas de radio, luz visible, microondas, rayos ultravioleta, etc., sin embargo, su diferencia que le da propiedades de ionizar y atravesar la materia está en su frecuencia, que es muy alta. Los rayos gamma se diferencian de los rayos X en su origen; los rayos gamma se generan dentro del núcleo, mientras que los rayos X en la estructura orbital electrónica.

Los rayos gamma pueden ser muy penetrantes y atravesar un cuerpo humano de parte en parte, pero quedan casi completamente absorbidos por una capa de concreto de un metro de espesor.

2.1.5 Energía de radiación

La energía de las radiaciones se expresa generalmente en millones de electrón volts (Mev), siendo un electrón volt la energía cinética adquirida por un electrón que parte del reposo y se mueve en el vacío a través de una diferencia de potencial de un volt ($1 \text{ ev} = 1.602 \times 10^{-12} \text{ ergs}$).

La energía de las partículas alfa es hasta del orden de 10 Mev aproximadamente, la energía de las emisiones beta hasta de 5 Mev aproximadamente y la de los fotones gamma hasta de unos 3 Mev. La energía se manifiesta en las partículas en forma de energía cinética y en los fotones en variaciones de la longitud de onda y de frecuencia, pues su velocidad es constante e igual que la velocidad de la luz en el vacío.

Todos los núcleos que tratan de llegar a la estabilidad mediante desintegración radiactiva lo hacen de modo determinado, aunque, es claro que, hay muchos que se desintegran por varios modos. El radio 226 por ejemplo se desintegra emitiendo partículas alfa, acompañadas de un fotón gamma; otros núcleos, en cambio, tienen alternativas de desintegración bien definidas por ejemplo el Níquel 57 tiene un proceso de desintegración en el cual el 50% de los núcleos se desintegra por emisión de positrones y el otro 50% mediante captura K. No sólo la forma de desintegración es constante para cada radionucleido sino que las emisiones tienen un valor energético característico.

2.1.6 Vida media

A este término también se le conoce por período de semidesintegración y es muy importante en los cálculos que se refieren a la determinación de la actividad remanente de un radionúclido, pues expresa el tiempo necesario para lograr la desintegración de 50% del número original de núcleos y está íntimamente relacionado con la constante de desintegración.¹

2.1.7 Interacción de las partículas alfa con la materia

Los mecanismos por los cuales un haz de partículas alfa interactúa con la materia en general son:

- A) Colisión inelástica con electrones orbitales.** En este caso se produce una excitación o la ionización del átomo con el cual interactúa la partícula. Así un electrón es arrancado de su órbita y se produce un ión positivo; que en conjunto se denomina par de iones.

- B) Colisión elástica con el núcleo.** Se produce una excitación del núcleo o una reacción nuclear en partículas de alta energía. Por otra parte puede producirse una colisión inelástica con el núcleo quedando este inalterado, pero la partícula sufre una deflexión; es decir, un cambio de dirección de su vector de velocidad. En alguna de estas reflexiones se puede producir un cuanto de radiación electromagnética llamada frenamiento Bremsstrahlung.

- C) Colisión elástica con electrones orbitales.** Este fenómeno ocurre solamente cuando la partícula posee ya muy baja energía cinética. La partícula pierde energía por choque con los electrones orbitales, conservándose la energía cinética del sistema.⁸

2.1.8 Radioisótopos empleados como trazadores

Una aplicación muy importante de los radioisótopos es su utilización como trazadores. En este caso, el isótopo radiactivo en vez de actuar como fuente de radiación aislada, se adiciona al sistema en estudio y se identifica con él. La sustancia marcada contiene tan sólo unas trazas de radioelemento, que puede ser imperceptible al análisis químico, pero mediante el empleo de un sistema lo suficientemente sensible de detección de radiaciones se puede seguir el desplazamiento de la sustancia en cualquier fase o lugar del proceso, siempre que el período de semidesintegración esté en concordancia con la duración del estudio y que las características de la radiación emitida sean adecuadas para el caso que se considere.

El análisis mediante trazadores radiactivos se compone de las etapas siguientes:

1. Marcado del producto, compuesto o elemento a seguir y controlar. Generalmente se debe identificar física y químicamente el trazador y el medio de estudio.
2. Inyección del trazador radiactivo o producto marcado. Ésta puede ser en forma continua o instantánea.
3. Medición y control del proceso en estudio. Esto se puede realizar en forma continua o por muestreo.

Requisitos que debe cumplir un trazador radiactivo:

- **Fidelidad:** debe seguir durante el proceso al producto marcado sin desprenderse o ser absorbido por las paredes del recipiente u otros elementos presentes en el sistema.
- **Concentración:** inferior a los niveles máximos permisibles. Superior o igual a las mínimas concentraciones detectables o medibles en las condiciones reales de trabajo.
- **Vida media:** compatible con la duración de la experiencia. Lo más corto posible para evitar inferencias entre dos experiencias sucesivas o contaminaciones residuales.¹

2.1.9 Polonio

El polonio es un elemento del grupo VI junto con el azufre, selenio y telurio, las estructuras electrónicas de los elementos del grupo VI se aproximan a las configuraciones que corresponden al gas inerte que les sigue, en consecuencia sus propiedades químicas son puramente no metálicas, con excepción de las del polonio y, en muy pequeña medida, las del telurio. Prácticamente, todos sus compuestos son covalentes.

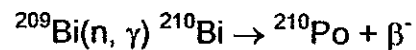
En el grupo de elementos que va del azufre al polonio, se hacen evidentes las variaciones graduales de las propiedades; a medida que aumenta el tamaño, decrece la electronegatividad, etc. Entre ellas se puede citar:

1. La estabilidad térmica de los compuestos H_2X decrece. El H_2T , por ejemplo, es muy endotérmico.
2. El carácter metálico de los elementos aumenta.
3. La tendencia de los elementos a formar complejos aniónicos aumenta.
4. Disminuye la estabilidad de los compuestos que contienen a los elementos en estados de oxidación formales elevados.
5. En el Po aparecen propiedades catiónicas así como también, pero muy poco desarrolladas, en el Te.

Además de la capacidad de los elementos que forman el grupo del S al Po para hibridizar los orbitales d con los s y p para formar más de cuatro enlaces con otros átomos.

El polonio se encuentra en los minerales de uranio y torio como producto de descomposición radiactiva. Su símbolo atómico es Po tiene un número atómico de 84, un peso atómico de 209 y una configuración electrónica de $[\text{Xe}]4f^{14}5d^66s^2$. El polonio fue el primer elemento descubierto por María Curie en 1898 se le obtuvo a partir de la peblenda, que contiene menos de 0.1 mg de Po por

tonelada. El polonio es también llamado radio F. El polonio es un elemento natural muy raro, los minerales de uranio contienen solamente 100 microgramos de Polonio por tonelada. El isótopo más accesible, que es el que se emplea para estudios químicos es el ^{210}Po , que decae por emisión alfa, con una vida media de 134.8 días. Actualmente se le obtiene en cantidades que van de los miligramos a los gramos por irradiación del bismuto en reactores nucleares:



1*

El polonio se separa del bismuto por sublimación o por alguno de los diversos métodos químicos posibles. El polonio-210 es muy peligroso de manejar incluso en cantidades de miligramos o microgramos por lo que es necesario un equipo especial y estricto control. La incorporación diaria de polonio es de 0.1 Bq. El polonio-210 contenido en el cuerpo es típicamente de 40 Bq con un 60% de su actividad en los minerales de los huesos.² La función $R(t) = e^{-0.693t/50}$, donde t es el tiempo, describe la retención biológica de polonio del cuerpo humano.⁹

Se conocen varios otros isótopos. El estudio de la química del polonio es dificultado por la intensa radiación alfa que emite, que ataca a las soluciones o los sólidos, desprende mucho calor y exige mucho manipuleo la aplicación de técnicas especiales, tendientes a la protección del operador.²

* La numeración de las ecuaciones es en orden correlativo.

2.1.10 Causas de la irradiación

El hombre en su vida diaria se encuentra continuamente expuesto a la radiación natural; debida a los rayos cósmicos que vienen del espacio y a la radiactividad natural del suelo debida a los minerales del radio, así como los gases radiactivos, como el radón que se produce por la desintegración del radio; también se encuentran los isótopos radiactivos de elementos estables, que contiene el cuerpo humano, todos de períodos muy largos.

La radiación natural o radiación de fondo está en aumento debido a los ensayos nucleares y a la expansión del uso de radioisótopos en la industria. Actualmente estos valores son aún bajos en comparación con la radiación natural propiamente dicha, como lo muestra los siguientes datos: radiación natural 67.6%, irradiación por tratamiento médico 30.7%, precipitación radiactiva 0.6%, fuentes diversas 0.5%, exposición profesional 0.45%, descarga radiactiva de la industria nuclear 0.15%, los datos se tomaron del boletín del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).¹

2.1.11 Niveles de radiotoxicidad

De acuerdo con el Reglamento de Licencias en Materias de Radioisótopos y Radiaciones Ionizantes, Organismo Ejecutivo Ministerio de Energía y Minas, se pueden clasificar los elementos radiactivos de acuerdo a su nivel de toxicidad en los siguientes grupos:

2.1.11.1 Grupo 1. Toxicidad muy alta

^{210}Pb , ^{210}Po , ^{223}Ra , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{227}Ac , ^{231}Pa , ^{230}U , ^{232}U , ^{233}U , ^{237}Np ,
 ^{238}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{242}Cm , ^{243}Cm , ^{249}Cf , ^{250}Cf , ^{252}Cf , ^{234}U , ^{227}Th ,
 ^{228}Th , ^{230}Th , ^{239}Pu , ^{245}Cm , ^{240}Pu , ^{244}Cm , ^{246}Cm .

2.1.11.2 Grupo 2. Toxicidad alta

^{22}Na , ^{36}Cl , ^{45}Ca , ^{46}Sc , ^{54}Mn , ^{56}Co , ^{60}Co , ^{91}Y , ^{95}Zr , ^{106}Ru , $^{110}\text{Ag}^{\text{m}}$, $^{115}\text{Cd}^{\text{m}}$,
 $^{114}\text{In}^{\text{m}}$, ^{124}Sb , $^{129}\text{Te}^{\text{m}}$, ^{124}I , ^{126}I , ^{131}I , ^{133}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , $^{152}\text{Eu}_{(13A)}$, ^{210}Bi , ^{154}Eu , ^{160}Th ,
 $^{170}\text{Tm}^{\text{m}}$, ^{181}Hf , ^{182}Ta , ^{207}Bi , ^{125}I , ^{211}At , ^{212}Pb , ^{224}Ra , ^{228}Ac , ^{230}Pa , ^{249}Bk , ^{89}Sr ,
 ^{125}Sb , ^{140}Ba , ^{192}Ir , ^{234}Th , ^{90}Sr , $^{127}\text{Te}^{\text{m}}$, ^{144}Ce , ^{234}Te , ^{236}U .

2.1.11.3 Grupo 3. Toxicidad moderada

^7Be , ^{14}C , ^{18}F , ^{24}Na , ^{38}Cl , ^{31}Si , ^{32}P , ^{42}K , ^{43}K , ^{47}Ca , ^{47}Sc , ^{48}Sc , ^{48}V , ^{51}Cr , ^{52}Fe ,
 ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{63}Ni , ^{65}Ni , $^{69}\text{Zn}^{\text{m}}$, ^{72}Ga , ^{73}As , ^{74}As , ^{76}As , ^{77}As , ^{75}Se , ^{87}Kr ,
 ^{86}Rb , ^{85}Sr , ^{91}Sr , ^{90}Y , ^{92}Y , ^{93}Y , ^{95}Nb , ^{99}Mo , ^{96}Te , $^{97}\text{Tc}^{\text{m}}$, ^{97}Tc , ^{99}Tc , ^{97}Ru , ^{105}Rh ,
 ^{103}Pd , ^{109}Pd , ^{105}Ag , ^{141}Ag , ^{109}Cd , ^{115}Cd , ^{125}Sn , ^{172}Sb , $^{125}\text{Te}^{\text{m}}$, ^{127}T , ^{129}Te , $^{131}\text{Te}^{\text{m}}$, ^{136}Cs ,
 ^{131}Ba , ^{140}La , ^{142}Pr , ^{143}Pr , ^{147}Nd , ^{149}Nd , ^{147}Pm , ^{149}Pm , ^{151}Sm , ^{155}Eu , ^{153}Gd , ^{159}Gd , ^{165}Dy ,
 ^{166}Dy , ^{166}Ho , ^{169}Er , ^{171}Tm , ^{175}Yb , ^{177}Lu , ^{181}W , ^{185}W , ^{187}W , ^{183}Re , ^{185}Os , ^{191}Os , ^{193}Os .

^{190}Ir , ^{194}Ir , ^{191}Pt , ^{197}Pt , ^{198}Au , ^{199}Au , ^{197}Hg , $^{197}\text{Hg}^m$, ^{203}Hg , ^{200}Tl , ^{201}Tl , ^{206}Bi , ^{212}Bi ,
 ^{220}Rn , ^{222}Rn , ^{231}Th , ^{233}Pa , ^{239}Np , ^{35}S , ^{52}Mn , ^{41}A , ^{64}Cu , ^{91}Zr , ^{103}Ru , $^{115}\text{In}^m$, ^{130}I ,
 ^{141}Ce , ^{153}Sm , ^{171}Er , ^{186}Re , ^{156}Ru , ^{202}Tl , ^{196}Au , ^{56}Nm , ^{65}Zn , $^{85}\text{Kr}^m$, $^{93}\text{Nb}^m$, ^{105}Ru ,
 ^{113}Sn , ^{132}I , ^{143}Ce , ^{162}Eu , ^{188}Re , ^{193}Pt , ^{203}Pb , ^{82}Br .

2.1.11.4 Grupo 4. Toxicidad baja

^3H , ^{15}O , ^{37}A , $^{58}\text{Co}^m$, ^{59}Ni , ^{69}Zn , ^{71}Ge , ^{87}Rb , ^{91}Ym , ^{93}Zr , ^{97}Nb , $^{96}\text{Tc}^m$, $^{99}\text{Tc}^m$,
 $^{103}\text{Rh}^m$, $^{131}\text{Xe}^m$, ^{133}Xe , $^{134}\text{Cs}^m$, ^{136}Cs , ^{147}Sm , ^{187}Re , $^{191}\text{Os}^m$, ^{232}Th , $^{\text{Nat}}\text{Th}$, ^{235}U , ^{238}U ,
 $^{\text{Nat}}\text{U}$, ^{85}Kr , $^{85}\text{Sr}^m$, $^{113}\text{In}^m$, ^{129}I , $^{193}\text{Pt}^m$, $^{197}\text{Pt}^m$.

2.1.12 Ley para el control, uso y aplicaciones de radioisótopos y radiaciones ionizantes (Ley nuclear) DT. 11-86.

Con el objeto de controlar, supervisar y fiscalizar las radiaciones ionizantes en sus diversos campos de aplicación, a fin de proteger la salud, los bienes y el medio ambiente de los habitantes de Guatemala, así como los bienes del Estado se promulgó la Ley para el Control, Uso y Aplicación de Radioisótopos y Radiaciones Ionizantes mediante el Decreto Ley 11-86.

De acuerdo con la Ley de control, uso y aplicación de radioisótopos y radiaciones ionizantes (artículos 6, 7 y 8) la Dirección General de Energía, Ministerio de Energía y Minas, extiende certificados de análisis de contaminación radiactiva a productos de exportación para determinar si se encuentran en los límites aptos para el consumo humano desde el punto de vista radiosanitario, límites establecidos por los países a los cuales se exportara, principalmente la Unión Europea y Estados Unidos.¹²

2.1.13 Efecto biológico de la radiación

El principal efecto biológico de la radiación en los tejidos vivientes es el de ionización, lo cual produce lesiones en las células o en los tejidos. Los primeros signos de daño, ocurren después de un período de tiempo conocido como período latente, que representa el intervalo de tiempo que transcurre antes de que se pueda detectar el daño. Este período puede variar entre amplios límites de tiempo y basándose en este período, se han dividido los efectos biológicos en agudos (se manifiestan en minutos, días o semanas) y a largo plazo (se presentan después de varios años, décadas o generaciones), cuanto mayor es la dosis más rápida la aparición de la lesión.

En irradiación externa lo más corriente son las quemaduras de piel, que se pueden comparar a las producidas por otras causas, pero éstas son más importantes. Se ha demostrado que la exposición a la radiación aumenta la incidencia de ciertos tipos de cáncer, leucemia y además produce una aceleración del proceso de envejecimiento, que resulta en un acortamiento de la vida. Otro efecto observado, es la modificación de la disposición de los genes

en los cromosomas, que dan al embrión o al ser irradiado o a su descendencia, caracteres hereditarios inesperados. En este caso, no existe un umbral para los efectos genéticos de la radiación. Cualquier dosis de radiación esta acompañada de mutaciones y la cantidad producida es proporcional a la dosis. Por eso, en cuanto a efecto genético, no hay dosis segura de tolerancia a la radiación.

En el caso de irradiación interna, el peligro es aún mayor pues, debido a la inhalación de polvo radiactivo, o bien por ingerir material radiactivo a través de productos alimenticios o cigarrillos contaminados, por contaminación de la manos que puede ser llevado a la boca, se puede depositar material radiactivo en el interior del cuerpo que da lugar a una exposición continua hasta que finaliza su desintegración o se produce la eliminación en forma natural del cuerpo. Claro está, que el riesgo estará en función de la cantidad de material ingerido, energía de radiación emitida, factor de efectividad biológica relativa (EBR), fijación electiva del isótopo en determinada parte del cuerpo y el período de semidesintegración efectivo T_{ef} , que se calcula de la siguiente manera:

$$T_{ef} = \frac{T_b * T_r}{T_b + T_r}$$

2

Donde:

T_{ef} = período de semidesintegración efectivo

T_b = período biológico; este factor considera la eliminación corporal ya que ciertos radioisótopos son evacuados en forma natural antes que otros.

2.1.14 Protección contra las partículas alfa

El único riesgo de las partículas alfa reside en la ingestión o inhalación de radioisótopos emisores alfa, ya que bastan unos pocos centímetros de aire para detenerla totalmente y su recorrido en el agua en aproximadamente 1/1000 del valor del aire. Sin embargo, en el interior del cuerpo, pueden dañar seriamente los tejidos debido a su alta ionización específica.

La manipulación de emisores alfa es poco peligrosa si no hay contacto directo o polvo radiactivo en suspensión; como medida adicional, éstos deben manejarse a una distancia mínima de 10 centímetros, la cantidad de material radiactivo a emplearse debe ser tan pequeña como la práctica lo permita y, además, es aconsejable usar material absorbente para que detenga cualquier derrame del líquido.

El equipo potencialmente contaminado no debe manipularse jamás con las manos descubiertas; las pipetas deben llenarse con succionadores especiales y nunca con la boca.

Cuando se realicen operaciones que producen gases radiactivos, es indispensable el uso de campana radioquímica, cuyas paredes carezcan de poros, como el acero inoxidable; además, es deseable el uso de pintura removible para facilitar la descontaminación.

Para trabajar polvos secos o material sumamente tóxicos, se debe emplear la caja de guantes que, por sus características permite manipular sin riesgo los emisores alfa y beta de baja energía y confinar en un pequeño recinto totalmente hermético cualquier contaminación que se pueda producir.¹⁰

2.1.15 Determinación de la concentración de actividad alfa

Para calcular la concentración de ^{210}Po en las muestras de suelo y sedimento marino analizadas, se realiza la integración del área de interés bajo los fotopicos del trazador ^{209}Po , y del radionucleido ^{210}Po .

Se obtiene el número de cuentas colectadas para cada fotopico y el fondo.

2.1.15.1 Concentración de actividad

$$A(\text{mBq/Kg}) = \frac{\frac{\text{C.st.}[A_{\text{Po}} - F_{\text{Po}}]}{t}}{\frac{\text{A.st.} - \text{F.st.}}{t}} \cdot m$$

3

Donde:

A = Concentración de actividad

C.st. = Actividad del trazador ^{209}Po en mBq

A_{po} = Área del fotopico del isótopo de interés

F_{po} = Fondo correspondiente al fotopico de interés

A.st. = Área del fotopico del estándar ^{209}Po

F.st. = Fondo correspondiente al fotopico del estándar normalizado a un tiempo igual al conteo de la muestra.

t = Tiempo de conteo de la muestra

m = masa de la muestra en Kg normalizada a un tiempo de conteo igual al conteo de la muestra.

2.1.15.2 Cálculo del error

$$E = \sqrt{\left[\frac{\sqrt{A_{Po} + F_{Po}}}{A_{Po} - F_{Po}} \right]^2 + \left[\frac{\sqrt{A_{st.} + F_{st.}}}{A_{st.} - F_{st.}} \right]^2}$$

4

Donde:

E = porcentaje de error

A_{Po} = Área del fotopico del Po de interés

F_{Po} = Fondo en el fotopico de interés para un tiempo igual al del conteo de la muestra.

F.st. = Área del fotopico del estándar ^{209}Po

F.st. = Fondo del fotopico correspondiente al estándar ^{209}Po para un tiempo igual al de conteo de la muestra.

2.1.16 Cálculo de la concentración mínima detectable

Para realizar el cálculo de la concentración mínima detectable se mide el fondo para el estándar interno ^{209}Po , así como para el radionucleido ^{210}Po y en los respectivos intervalos de energía de emisión.

$$\text{CMD} = \frac{\frac{(\text{C.st.})4.66\sqrt{F_{\text{Po}}}}{t}}{\frac{\text{A.st.}}{t} \cdot m}$$

5

Donde:

CMD = Concentración mínima detectable

C.st. = Actividad del trazador ^{209}Po en mBq

F_{po} = Fondo en el fotopico de interés para un tiempo igual al de conteo de la muestra.

A.st. = Área del fotopico del estándar ^{209}Po

t = Tiempo de conteo fondo igual al de conteo de la muestra

m = masa de la muestra

2.1.17 Desviación estándar

$$A \pm A * E$$

6

Donde:

A = Actividad en mBq/Kg

E = porcentaje de error

2.2 Universo de trabajo

Suelos cultivados con maíz, café, cardamomo y caña de azúcar de 8 departamentos de Guatemala, tomados como puntos de referencia los siguientes: Quiché, Izabal, Quetzaltenango, San Marcos, Escuintla, Petén, Baja Verapaz y Alta Verapaz.

Ocho muestras de sedimentos marinos del océano Pacífico y Atlántico de Guatemala, tomados como puntos de referencia los siguientes:

- **Océano Pacífico:** Las Lisas, Champerico, Puerto Quetzal
- **Océano Atlántico:** Punta de Palma, Punta de Manabique y bahía de Amatique

Los materiales de referencia radiactivo patrón (^{209}Po) proporcionado y certificado por el OIEA.

2.3 Recursos materiales

2.3.1 Reactivos

- Solución estándar radiactiva de ^{209}Po certificada por el OIEA con actividad de concentración de 40.41 mBq/g
- Solución de nitrato de plomo: [10 mg de Pb/ml] - 15.98 g $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2/\text{L}$ de HNO_3 1:99
- Solución de tioacetamida: [100 g de tioacetamida/L de agua]
- Solución saturada de ácido ascórbico
- 3 litros de ácido nítrico
- 3 litros de ácido clorhídrico
- 3 litros de hidróxido de amonio
- Agua destilada

2.3.2 Cristalería y equipo

- 10 beakers de 600 ml
- 1 beaker de 10 ml
- 1 beaker de 50 ml
- 3 embudos medianos
- 2 embudos pequeños
- 1 balón aforado de 1000 ml
- 5 earlenmeyers de 250 ml
- 4 kitasatos de 1000 ml
- 10 vidrios de reloj de 10 cm de diámetro

- 3 varillas de vidrio
- 2 espátulas
- 20 tubos de ensayo
- 2 probetas de 50 ml
- 1 probeta de 100 ml
- 2 probetas de 25 ml
- Papel filtro marca Whatman 42 ashless
- Papel filtro marca Whatman 41 ashless
- Agitador de teflón
- 1 cámara de vacío Canberra 7400 A
- 1 detector de iones implantados de silicio planar (PIPS)
- 1 preamplificador de señales Canberra 2004 M
- 1 celda electrolítica de teflón para deposición alfa
- 1 fuente de voltaje regulado DC 0 – 30 V y 0 – 3 A
- 1 Trio Dual DC Power Supply modelo PR-630
- 1 horno Blue M. modelo SW-IITA-1
- 1 Mufla Thermolyne 2000
- 1 mezcladora de muestras sólidas SPEX 8000 MIXER/MILL
- 1 pulverizador Fritsh Type 02102
- 1 campana de extracción gaseosa LABCONGO
- 1 digestor de muestras por microondas Milestone MLS-1200 Mega con control de potencia y temperatura
- 1 destilador de agua Cornig Mega – Pure System MP-45
- 1 lote de discos de cinc pulidos de 2 cm de diámetro y espesor de 2 mm para deposición de ^{210}Po
- 1 fuente de calibración de espectros alfa de 4 picos de ^{233}U , ^{239}Pu y ^{244}Cm
- 1 sistema electrónico para espectrometría alfa compuesto por:
 - Fuente de bajo poder Camberra modelo 2000
 - Fuente H.V. Power Supply Camberra modelo 3106 B

- Amplificador de señales Canberra 2026
- Convertidor analógico digital Canberra 8075
- Osciloscopio TRIO Cs-1040
- Tarjeta S-1000 para análisis de espectros alfa
- 1 computadora DTK 80486DX con disco duro de 115 MB
- 1 impresora Epson LX-810L

2.4 Procedimiento general

2.4.1 Técnica de muestreo

2.4.1.1 Suelos cultivados

El muestreo de suelos cultivados se realizó, por conveniencia, en 8 departamentos de Guatemala en los departamentos del Quiché, Izabal, Quetzaltenango, San Marcos, Escuintla, Petén, Baja Verapaz y Alta Verapaz. Estos puntos de muestreo fueron seleccionados tomando en cuenta la topografía plana del suelo y el tipo de cultivo.

1. Se delimitó un área de suelo cultivado de 10 x 10 metros.
2. Se procedió a limpiar de maleza o pastos el suelo cultivado y se extrajeron las muestras de suelo de un área de 20 x 20 centímetros y una profundidad de 30 centímetros cada una.
3. Para el área delimitada, se extrajeron 10 muestras las cuales fueron reunidas en un solo recipiente.

2.4.1.2 Sedimentos marinos

El muestreo de sedimentos marinos se realizó en 3 puntos del Océano Pacífico de Guatemala:

- Las Lisas: 13° 50'00" latitud N y 90° 23'28" longitud O, profundidad 28 m
- Puerto Quetzal: 13° 53'93" latitud N y 90° 42'65" latitud O, profundidad 33 m
- Champerico: 14° 50'99" latitud N y 91° 50'06" latitud O, profundidad 23 m

El muestreo de sedimentos marinos se realizó en 3 puntos del Océano Atlántico de Guatemala: Punta de Palma, Punta de Manabique y bahía de Amatique: 15° 52'21" latitud N y 88° 40'77" latitud O, profundidad 22 m

Para el efecto se utilizó un muestreador de sedimentos tipo draga de acero inoxidable con dispositivo de cierre automático para evitar la contaminación de las muestras.

2.4.2 Preparación de la muestra

2.4.2.1 Tratamiento previo

2.4.2.1.1 Suelos

1. Eliminar humedad del total de cada muestra a temperatura ambiente.
2. Tamizar 1000 gramos de la muestra en tamiz de 18 Mesh.
3. Secar en un horno a 100 grados centígrados.

4. Calcinar cada porción de muestra de 1000 gramos en Mufla a una temperatura de 400 grados centígrados.

2.4.2.1.2 Sedimentos marinos

1. Eliminar humedad del total de cada muestra a temperatura ambiente.
2. Pulverizar 1000 gramos de la muestra.
3. Calcinar cada porción de muestra de 1000 gramos en Mufla a una temperatura de 400 grados centígrados.

2.4.3 Tratamiento radioquímico

2.4.3.1 Suelos y sedimentos marinos

1. Pesar 40 gramos de la muestra dentro de un beaker de 600 ml.
2. Agregar 5 ml de portador de plomo y 5 ml de 40.41 mBq/g de solución trazadora de ^{209}Po .
3. Agregar 50 ml de HNO_3 y 30 ml de HCl .
4. Calentar sobre una estufa eléctrica. Repetir las adiciones de HNO_3 y HCl hasta la mayor dilución de la muestra.
5. Adicionar 20 ml de HNO_3 .

6. Si el material insoluble persiste, filtrar el slurry por gravedad a través de un filtro Whatman número 42 en un tubo de centrifugación. Descartar el residuo.

2.4.4 Deposición de ^{210}Po

2.4.4.1 Suelos y sedimentos marinos

1. Reducir el volumen a cerca de 20 ml. Adicionar 100 ml de agua destilada.
2. Ajustar el pH a 3.5– 4 con NH_4OH . Agregar 20 ml de solución de Tioacetamida. Digerir por una hora.
3. Enfriar, centrifugar y decantar el sobrenadante.
4. Disolver el precipitado en 8 ml de HCl. Adicionar 100 ml de agua destilada.
5. Ajustar el a 3.5–4 con NH_4OH . Agregar 10 ml de solución de Tioacetamida. Digerir por una hora.
6. Enfriar, centrifugar y decantar el sobrenadante.
7. Disolver el precipitado en 5 ml de HCl. Diluir la solución a 50 ml de agua destilada.

8. Filtrar la solución por gravedad a través de un filtro Whatman No. 41 dentro de una celda de deposición preparada. Lavar el filtro con HCl 0.1 N caliente. Descartar el filtro.
9. Adicionar 1 ml de ácido ascórbico saturado a la celda.
10. Dejar la celda en un baño de 80 grados centígrados.
11. Agitar con un agitador de teflón por 4 horas a una velocidad de agitación sin salpicaduras. Ocasionalmente agregar pequeñas cantidades de HCl 0.5 N según se evapore la solución.
12. Remover la celda de el baño de agua y pasar la solución a un beaker.
13. Desarmar la celda, lavar el disco con agua, luego etanol. Secar con aire seco el disco.
14. Medir el disco en un sistema de espectrometría alfa.
15. Estandarizar con una cantidad conocida de ^{210}Po depositada como se describe arriba.

2.4.5 Condiciones del sistema electrónico

Existen las siguientes condiciones para el equipo electrónico, para la medición de la actividad alfa por ^{210}Po :

1. Conectar el preamplificador a la fuente de bajo poder (± 12 y ± 24 VDC).
2. Instalar la sensibilidad a 1V/div., acoplar DC, y el tiempo base a 10 u s/div.
3. Realizar la lectura de fondo radiactivo del amplificador mas amplificador en el voltímetro.
4. Medir fondo.

2.4.6 Condiciones previas al conteo alfa

1. Aplicar vacío a aproximadamente 10^{-3} micrones, a la cámara de operación conteniendo el porta muestra y el detector de iones implantados de silicio planar (PIPS), para evitar dispersión de partículas y baja resolución.
2. Ajustar la distancia entre el portadisco de muestra y el detector de barrera superficial a 4 mm.

3. Accionar el sistema de enfriamiento para reducir el ruido térmico y de corriente reversa hacia el detector.
4. Mantener el detector en vacío constante y en la oscuridad durante la medición de la muestra.
5. Calibrar el sistema de conteo con una fuente alfa patrón y establecer la ganancia óptima de operación.
6. Para lograr una calibración precisa se usa una fuente estándar alfa 4 picos compuesta por ^{233}U , ^{239}Pu y ^{244}Cm .
7. El espectro deberá poseer 4 picos correspondientes a las energías de los mismos en Kev de relación lineal canal – energía.
8. Contar las radiaciones por segundo para ^{210}Po depositado a partir de las muestras de suelos cultivados y sedimentos marinos tratados por un proceso radioquímico.

2.4.7 Calibración del sistema de medición de espectrometría alfa.

La calibración se llevó acabo en energías con fuente patrón de ^{233}U , ^{239}U , ^{238}Pu y ^{244}Cm .

Tabla I. Energías de calibración del sistema de medición de espectrometría alfa

Radionucleido	Canal de calibración	Energía teórica (Kev)	Energía de calibración (KeV)
^{233}U	2533	4820	4820
^{239}U	2728	5157	5157
^{238}Pu	2909	5499	5498
^{244}Cm	3071	5802	5804

3. RESULTADOS

Tabla II. Concentración de actividad de ^{210}Po en sedimentos marinos del Océano Pacífico

No.	Lugar	Concentración de ^{210}Po en la muestra (Bq/Kg)	Concentración mínima detectable (Bq/Kg)	Error
1	Las Lisas	17.83 ± 3.13	0.051	1.76 %
2	Champerico	14.67 ± 0.23	0.031	1.57 %
3	Puerto Quetzal	61.67 ± 1.16	0.055	1.88 %

Tabla III. Concentración de actividad de ^{210}Po en sedimentos marinos del Océano Atlántico

No.	Lugar	Concentración de ^{210}Po en la muestra (Bq/Kg)	Concentración mínima detectable (Bq/Kg)	Error
1	Punta de Palma	39.55 ± 8.16	2.12	20.63 %
2	Punta de Manabique	32.26 ± 1.15	0.17	3.58 %
3	Bahía de Amatique	94.36 ± 34.72	3.23	36.80 %

Tabla IV. Concentración de actividad de ^{210}Po en suelos agrícolas

No.	Departamento	Concentración de ^{210}Po en la muestra (Bq/Kg)	Concentración mínima detectable (Bq/Kg)	Error
1	Petén	27.70 ± 1.37	0.31	4.96 %
2	Izabal	No Detectado	---	---
3	Quiché	0.30 ± 0.038	0.084	12.69 %
4	Escuintla	49.64 ± 3.11	0.49	6.27 %
5	San Marcos	15.93 ± 1.35	0.68	8.50%
6	Baja Verapaz	27.80 ± 1.63	0.41	5.87 %
7	Alta Verapaz	29.98 ± 1.24	0.23	4.16 %
8	Quetzaltenango	111.88 ± 8.47	0.68	7.57 %

Tabla V. Actividad anual (40 horas/semana) de ^{210}Po en sedimentos marinos del océano Pacífico

No.	Lugar	Actividad anual de ^{210}Po en la muestra (Bq)
1	Las Lisas	1369.34
2	Champerico	1126.66
3	Puerto Quetzal	4736.26

Tabla VI. Actividad anual (40 horas/semana) de ^{210}Po en sedimentos marinos del océano Atlántico

No.	Lugar	Actividad anual de ^{210}Po en la muestra (Bq)
1	Punta de Palma	3037.44
2	Punta de Manabique	2477.57
3	Bahía de Amatique	7246.85

Tabla VII. Actividad anual (40 horas/semana) de ^{210}Po en suelos agrícolas

No.	Departamento	Actividad anual de ^{210}Po en la muestra (Bq)
1	Petén	2127.36
2	Izabal	No Detectado
3	Quiché	23.04
4	Escuintla	3812.35
5	San Marcos	1223.42
6	Baja Verapaz	2135.04
7	Alta Verapaz	2302.46
8	Quetzaltenango	8592.38

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos en este estudio se confirma la hipótesis planteada inicialmente; si existe contaminación radiactiva natural de ^{210}Po , emisor de radiación alfa, en los suelos agrícolas y sedimentos marinos de los océanos Atlántico y Pacífico de Guatemala. Ésta fue cuantificable por medio de espectrometría alfa.

La mayor concentración de ^{210}Po se encontró en las muestras de sedimentos marinos, estos resultados se presentan en las tablas II y III, donde se muestra la mayor concentración de actividad de ^{210}Po las muestras de sedimentos marinos pertenecientes a Las Lisas (17.83 ± 3.13 Bq/Kg), bahía de Amatique (94.36 ± 34.72 Bq/Kg) y Puerto Quetzal (61.67 ± 1.16 Bq/Kg).

Existe mayor probabilidad de encontrar mayor concentración de ^{210}Po en los sedimentos marinos de los océanos debido a los aportes continentales de arcillas o limos, que quedan en suspensión en las aguas marinas. Así como las actividades humanas como la edificación de complejos turísticos en zonas costeras o la tala de bosques, con sus consecuencias sobre la erosión del terreno que implican la incorporación adicional de sedimentos terrígenos y sustancias contaminantes en los medios marinos someros. "Los restos y fragmentos de conchas y esqueletos calcáreos forman sedimentos tanto en zonas continentales (lagos, cursos fluviales) como marinas. Las mayores acumulaciones se concentran en zonas marinas cálidas de escasa profundidad,

adosadas a continentes e islas, que definen dominios de sedimentación conocidos como plataformas carbonatadas".⁶

Mientras que en los suelos agrícolas analizados en este estudio se encuentra en menor concentración el radionucleido ^{210}Po . Las mayores concentraciones de ^{210}Po en suelos agrícolas, cuyos datos se presentan en la tabla IV, se encuentran en las muestras de los departamentos de Quetzaltenango (111.88 ± 8.47 Bq/Kg) y Escuintla (49.64 Bq/Kg ± 3.11), en los demás departamentos, se encuentra el ^{210}Po en menor concentración y en departamento de Izabal no fue posible detectarlo.

La diferencia en los valores obtenidos en las concentraciones de ^{210}Po en los suelos agrícolas está relacionada a factores relativos al suelo analizado, entre los cuales están: la migración de los radionucleidos en los suelos cultivados por los efectos de erosión, las características de textura así como la composición del mismo.

En las tablas II, III y IV se muestran los valores para las cantidades mínimas detectables por el sistema de espectrometría alfa, utilizada para medir la concentración de ^{210}Po en las muestras de suelo y sedimentos marinos de los océanos Atlántico y Pacífico. La determinación de ^{210}Po es mayor que las cantidades mínimas detectables, la diferencia entre estos valores es grande y por lo tanto los resultados obtenidos presentan confiabilidad.

Los resultados de la actividad anual de ^{210}Po en las muestras de sedimentos marinos y suelos agrícolas obtenidos en este estudio, tablas V, VI y VII, son mucho menores que los límites anuales de incorporación (LAI) de ^{210}Po vía oral, tabla VIII, por lo tanto el aporte de ^{210}Po al fondo radiactivo natural y artificial es mínimo en los suelos agrícolas y sedimentos marinos. Por lo cual no existe riesgo de contaminación elevada por el radionucleido ^{210}Po en los suelos y sedimentos marinos analizados en este estudio por espectrometría de emisión alfa. Por lo tanto las actividades de cultivo y pesca se pueden seguir llevando a cabo en las áreas analizadas sin riesgo de contaminación elevada para los productos agrícolas y especies marinas.

Los espectros correspondientes a los suelos agrícolas y los sedimentos marinos de los océanos Atlántico y Pacífico que se analizaron, presentan picos característicos correspondientes a ^{209}Po (4.88 Mev) y ^{210}Po (5.305 Mev) según las energías de calibración.¹³

El ^{209}Po se usó como estándar interno para cuantificar el Po^{210} . La determinación de ^{210}Po se realiza basándose en la integral del fotopico de interés y a partir de este se encuentran la concentración de actividad y la concentración mínima detectable, así como su error y la desviación estándar.

Los fotopicos correspondientes a ^{210}Po y ^{209}Po de las muestras de suelo agrícola y sedimentos marinos presentan colas de baja energía. Esto es consecuencia de la presencia de impurezas metálicas junto con el polonio depositado en los discos de cinc. Esto provoca autoabsorción de las partículas alfa y contribuye a una disminución de la resolución de los fotopicos.

Las colas de baja energía se deben principalmente a la pérdida de energía cinética de las partículas alfa en su trayectoria al detector de iones implantados de silicio planar (PIPS) y es posible que cantidad de metales radiactivos interferentes de ^{209}Po hayan sido depositados como impurezas juntos con el ^{210}Po . Las energías de emisión de estos radionucleidos son muy cercanas a las de ^{209}Po y esto también contribuye a pérdida de resolución en los fotopicos.

La calibración y ajuste del sistema de espectrometría alfa es de suma importancia para la mejor resolución de los fotopicos. Para asegurar que la mayoría de las partículas radiactivas lleguen al detector se colocó la muestra depositada a 3 mm del detector y se aplicó vacío a la cámara de medición para evitar la dispersión inelástica de las partículas alfa y una disminución en la eficiencia del conteo y resolución.

CONCLUSIONES

1. Existe contaminación radiactiva por el radioisótopo natural ^{210}Po en los suelos agrícolas y sedimentos marinos de los océanos Atlántico y Pacífico de Guatemala.
2. Los valores de concentración de actividad de ^{210}Po en suelos agrícolas y sedimentos marinos son menores a los límites anuales de incorporación máximos permisibles.
3. Los valores más altos de concentración de ^{210}Po encontrados en las muestras analizadas, corresponden a los sedimentos marinos de los océanos Atlántico y Pacífico de Guatemala.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar las actividades de concentración de ^{210}Po determinadas en este estudio para posteriores investigaciones sobre contaminación natural y artificial por radiación alfa.
2. Realizar investigaciones de contaminación de ^{210}Po en productos agrícolas de interés comercial para consumo nacional y de exportación.
3. Mantener un programa de monitoreo ambiental permanente, evaluando los niveles de contaminación radiactiva anual en suelos agrícolas, productos agrícolas, sedimentos marinos y especies marinas; para evaluar cualquier cambio que se produzca en el ambiente debido al contaminación radiactiva natural y artificial.
4. Investigar la contaminación por ^{210}Po en perfiles de suelo a diferentes profundidades para analizar densidades de concentración de actividad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. R. Pineda. "Radioisótopos en la Industria", Tesis, Ing. Industrial, Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1981.
2. A. Cotton. **Química inorgánica avanzada**, (3a. ed. México: Editorial Limusa, (1974), pp. 547-555.
3. O. Lacob y otros. "Annual effective doses from natural sources in Moldavia", **Radiation and society: comprehending radiation risk**, Internacional Atomic Energy Agency, Viena (1994), pp. 51-55.
4. A. Martínez y otros. "Transfer of natural radionuclides from soils to plants in a wet marshland", **Applied radiation and isotopes**, (1996), pp. 1103 - 1108.
5. R. Saito y otros. "Analysis of ^{210}Po in marine samples", Journal of Radioanalytical and nuclear chemistry, (1997), pp. 117-119.

6. R. Ditchburn. "Analysis of sediments from lakes Waihola an Waipori for ^{210}Pb ." **Institute of Geological and Nuclear Sciences report No. 97/38**", (1997), pp.1-4.

7. T. Gribanova. "Alpha spectrometry monitoring of metallurgic concern territory In Sillamjae (Estonia)", **Radiokhimiya**, (1996), pp.355-360.

8. "CONCEPTS and examples of safety analyses for radioactive waste resistories in continental geological formation". **Safety series**, Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena (1983). pp. 5-7.

9. "BIOLOGICAL Effects of Inhaled Radionuclides". A report of a Task Group of Committee 1 of Intenational Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, New York (1979). pp. 96.

10. "PROCEDIMIENTOS de protección radiológica". **Colección seguridad No. 38**, Organismos Internacional de Energía Atómica, Viena (1974).

11. "REGLAMENTO de licencias en materias de radioisótopos y radiaciones ionizantes". Guatemala, C.A. Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Energía. pp. 3 y 4.

12. "LEY para el control, uso y aplicaciones de radioisótopos y radiaciones ionizantes (Ley nuclear) DT. 11-86." Guatemala, C.A. Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Energía. pp. 1- 6.

13. "BASIC safety standards for radiation protection." **Safety series No. 9** Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena (1982). pp. 119.

ANEXOS

Tabla VIII. Datos originales de los sedimentos marinos de los océanos Atlántico y Pacífico

No.	Océano Pacífico	Integral de pico de ^{209}Po (cuentas)	Integral de pico de ^{210}Po (cuentas)
1	Las Lisas	3410	119405
2	Champerico	5543	16068
3	Puerto Quetzal	3132	37941
No.	Océano Atlántico	Integral de pico de ^{209}Po (cuentas)	Integral de pico de ^{210}Po (cuentas)
1	Punta de Palma	82	470
2	Punta de Manabique	983	6149
3	Bahía de Amatique	54	522

Tiempo de conteo (s) = 200000

Fondo correspondiente al fotopico estándar ^{209}Po = 29

Fondo correspondiente al fotopico de ^{210}Po = 55

Tabla IX. Datos originales de suelos agrícolas

No.	Departamento	Integral de pico de ^{209}Po (cuentas)	Integral de pico de ^{210}Po (cuentas)
1	Petén	558	2956
2	Izabal	844	No detectado
3	Quiché	2064	177
4	Escuintla	355	3259
5	San Marcos	254	765
6	Baja Verapaz	418	2196
7	Alta Verapaz	754	4358
8	Quetzaltenango	256	5083

Tiempo de conteo (s) = 200000

Fondo correspondiente al fotopico estándar ^{209}Po = 29

Fondo correspondiente al fotopico de ^{210}Po = 55

Tabla X. Límites anuales de incorporación, LAI (Bq) y concentraciones derivadas en aire, CDA (Bq/m³) (40 horas/semana) para isótopos del polonio

RADIONUCLEIDO		VÍA ORAL	INHALACIÓN	
		A	b	c
²⁰³ Po	LAI	9×10^8	2×10^9	3×10^9
	CDA	----	1×10^6	1×10^6
²⁰⁵ Po	LAI	8×10^8	1×10^9	3×10^9
	CDA	----	6×10^5	1×10^6
²⁰⁷ Po	LAI	3×10^8	9×10^8	1×10^9
	CDA	----	4×10^5	4×10^5
²¹⁰ Po	LAI	1×10^5	2×10^4	2×10^4
	CDA	----	1×10^1	1×10^1

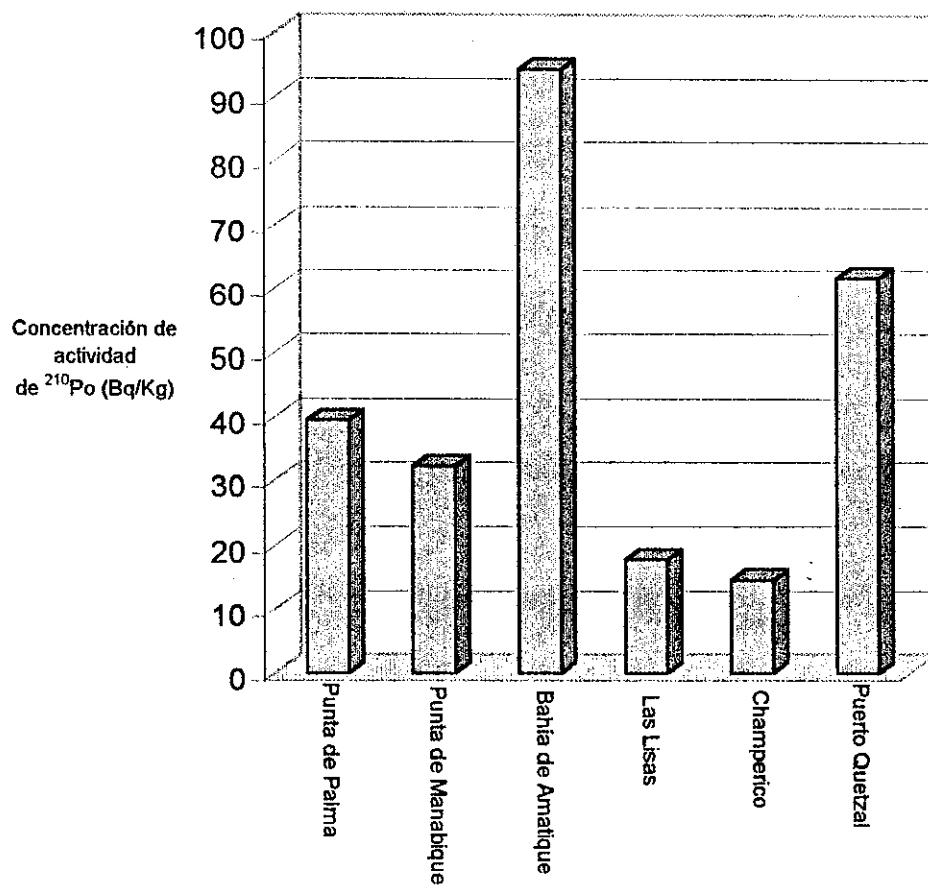
Donde:

a = Para todos los compuestos del polonio.

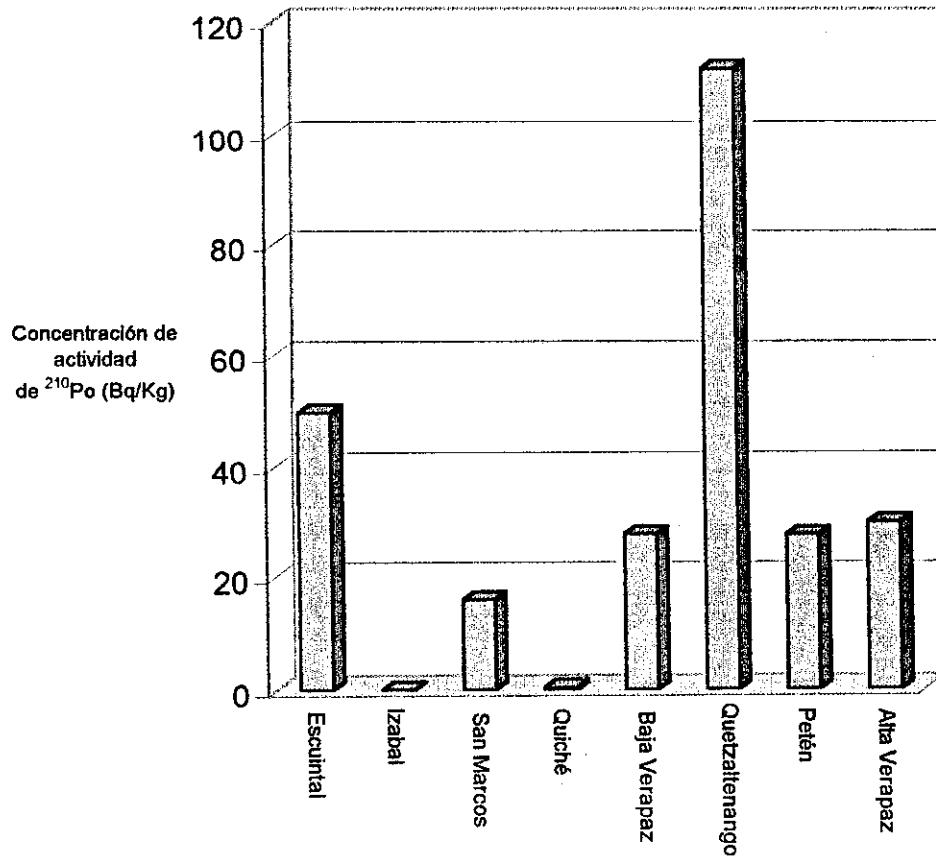
b = Todos los compuestos del elemento, excepto los indicados en c.

c = Oxidos, hidróxidos, nitratos.

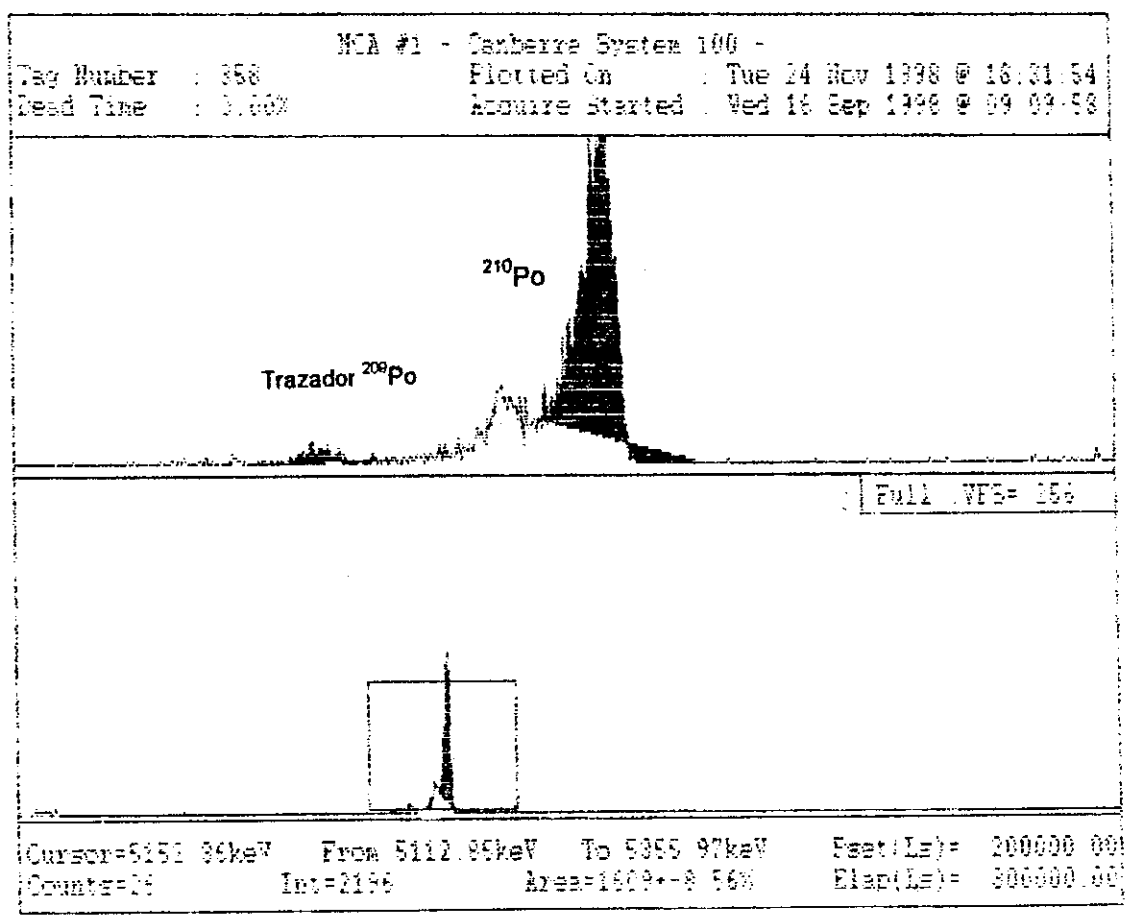
Gráfica 1. Concentración de actividad de ^{210}Po en sedimentos marinos de los océanos Atlántico y Pacífico



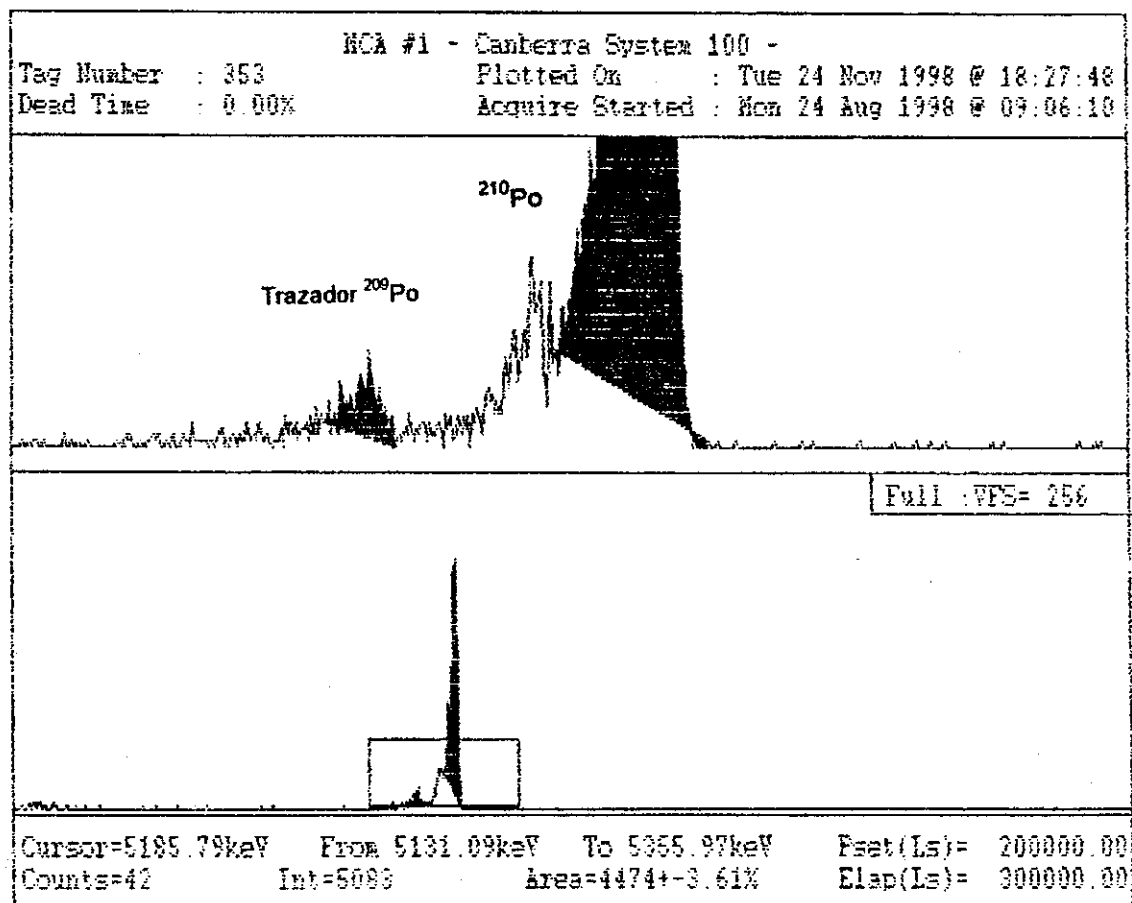
Gráfica 2. Concentración de actividad de ^{210}Po en suelos agrícolas



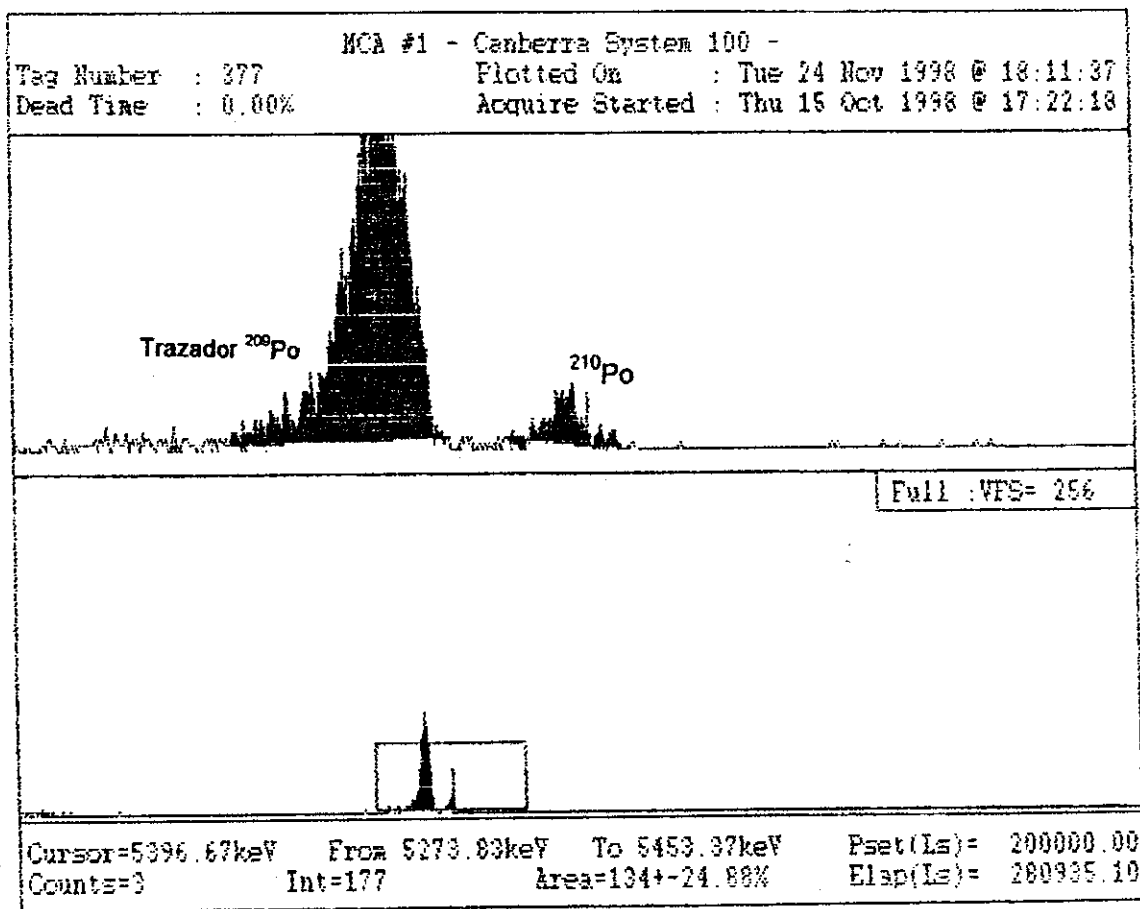
Gráfica 3. Espectro de emisión de ^{209}Po y ^{210}Po en la muestra de suelo agrícola del departamento de Baja Verapaz



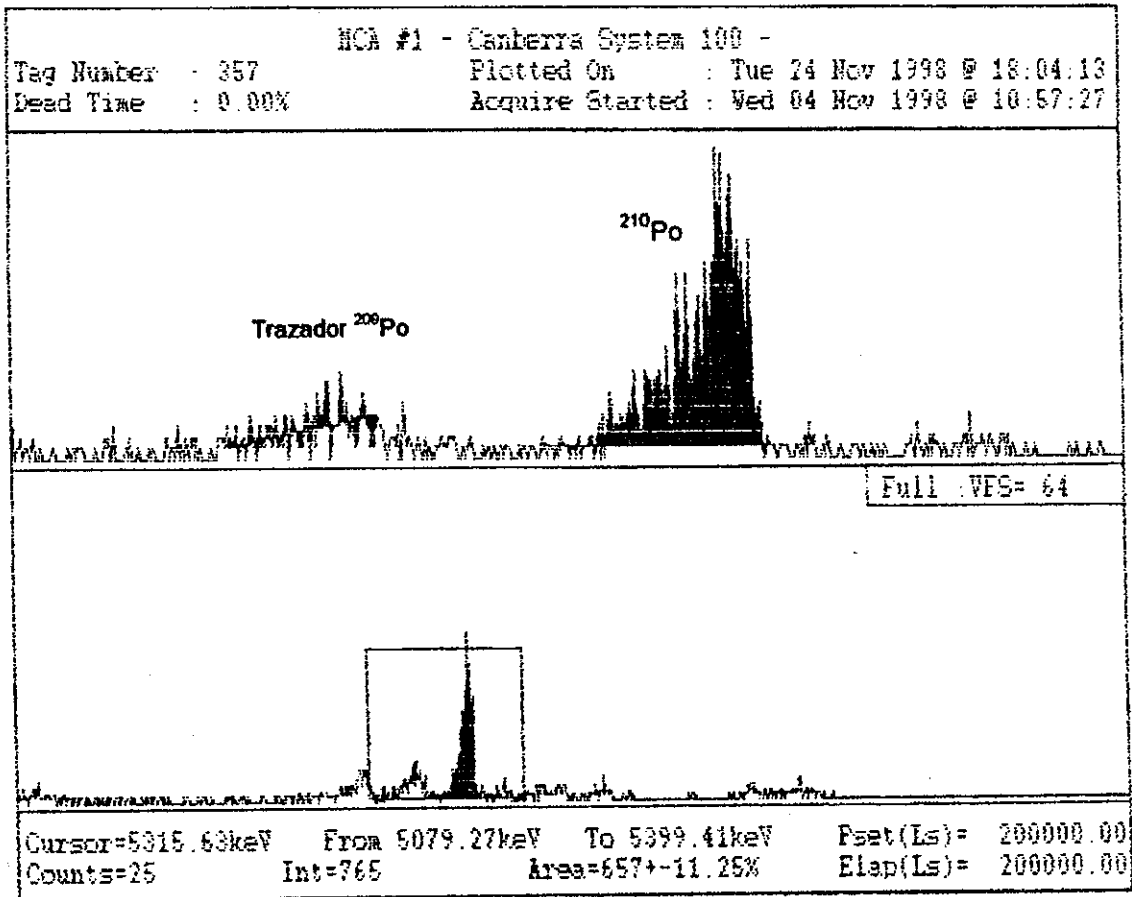
Gráfica 4. Espectro de emisión de ^{209}Po y ^{210}Po en la muestra de suelo agrícola del departamento de Quetzaltenango



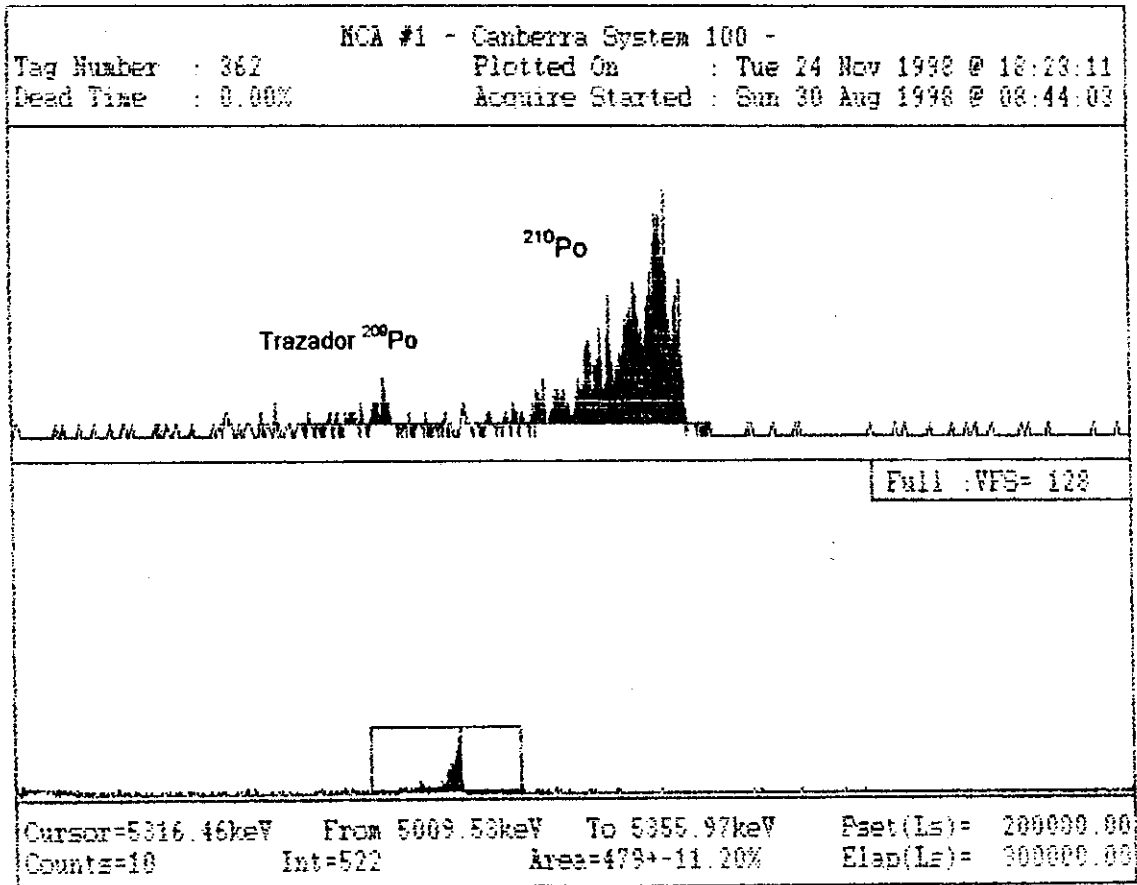
Gráfica 5. Espectro de emisión de ^{209}Po y ^{210}Po en la muestra de suelo agrícola del departamento de Quiché



Gráfica 6. Espectro de emisión de ^{209}Po y ^{210}Po en la muestra de suelo agrícola del departamento de San Marcos



Gráfica 7. Espectro de emisión de ^{209}Po y ^{210}Po en la muestra de sedimento marino de la bahía de Amatique



Gráfica 8. Espectro de emisión de ^{209}Po y ^{210}Po en la muestra de sedimento marino de Punta de Palma

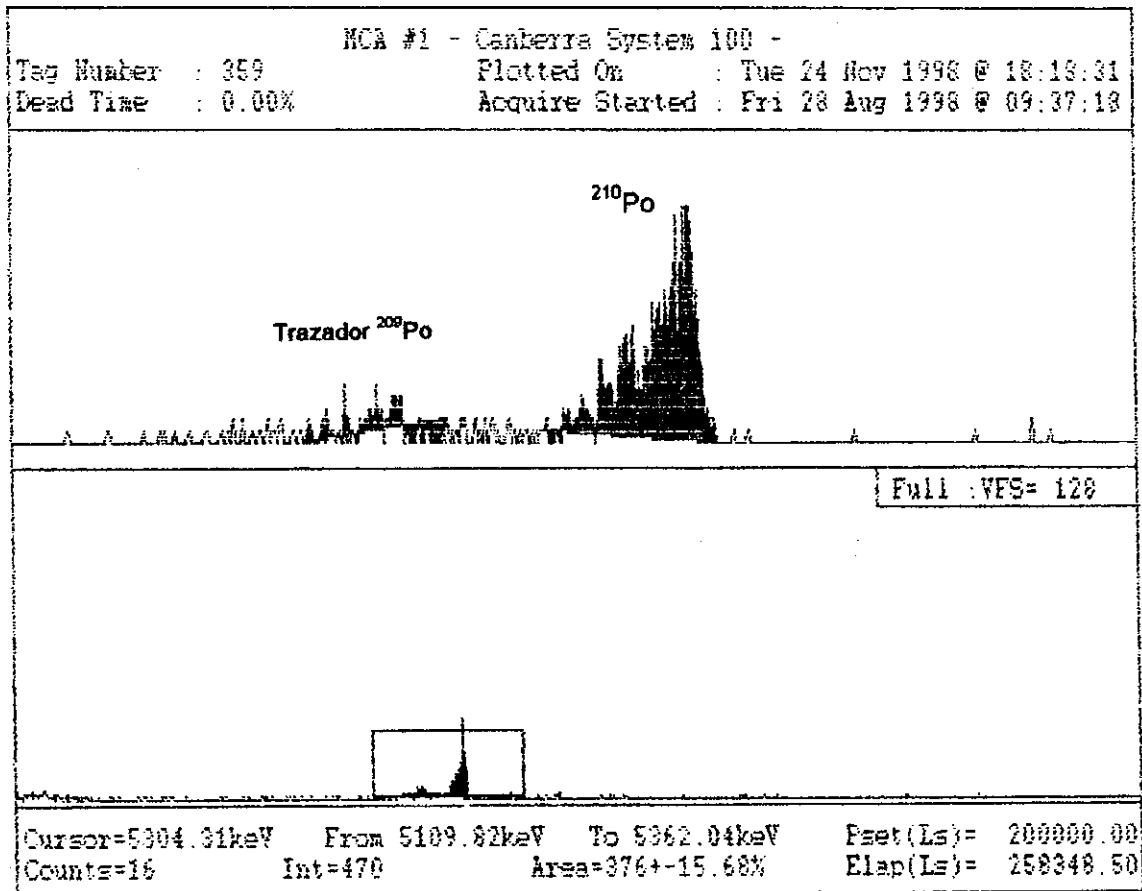


Figura 9. Rutas de contaminación por el radionucleido ^{210}Po a los seres humanos

