



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS QUÍMICAS

Determination of radioactive contaminant ^{137}Cs (fission product) and comparison with natural ^{40}K present in mexican strawberries

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

Química en Alimentos Frida Concepción Fuentes Gama

A handwritten signature in black ink, appearing to read "J. Navarrete Tejero".

Doctor Juan Manuel Navarrete Tejero
Facultad de Química

CdMx. Agosto, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS QUÍMICAS

Determination of radioactive contaminant ^{137}Cs (fission product) and comparison with natural ^{40}K present in mexican strawberries

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

Q.A. Frida Concepción Fuentes Gama

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J. Navarrete'.

Doctor Juan Manuel Navarrete Tejero
Facultad de Química

CdMx. Agosto, 2022

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), donde contaba con un número de CVU 1100355, institución la cual me brindó un apoyo económico mensual, con el cual permitió mi estancia y ayudó a mantener mi desempeño académico.

Gracias al Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas, por permitirme estudiar mi posgrado y darme la oportunidad de comenzar en el campo de la investigación científica.

Con lo cual se completó la publicación de un artículo con cita: Gama, F. , Tejero, J. , Chávez, A. and Pérez, M. (2022) Determination of Radioactive Contaminant ^{137}Cs (Fission Product) and Comparison with Natural ^{40}K Present in Mexican Strawberries. Journal of Geoscience and Environment Protection, 10, 257-265. doi: 10.4236/gep.2022.107015.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, y a la Facultad de Química, por darme la formación necesaria para alcanzar mis metas.

Gracias a mi tutor, el Dr. Juan Manuel Navarrete Tejero, fue un honor y un privilegio haber recibido su apoyo y enseñanzas para la realización de este proyecto.

Gracias a Alejandro Chávez Ramírez por su apoyo técnico, en la realización de este trabajo.

Gracias a mis sinodales por la revisión y discusión de este trabajo.



RESUMEN

Se han publicado varios trabajos anteriormente, por diferentes autores, sobre la contaminación radiactiva en suelos, sedimentos marinos y alimentos mexicanos. Los resultados han mostrado principalmente pequeñas concentraciones de isótopos naturales. La investigación que continúa en el grupo de trabajo de este informe ha conducido al sorprendente hallazgo del producto de fisión ^{137}Cs ($t_{1/2} = 30$ años) en fresas producidas en diferentes estados de la república, a unos 2000 km de distancia entre sí. Nunca antes se había observado tal contaminante en alimentos producidos en este país. El objetivo de este trabajo es reportar la presencia de ^{137}Cs en fresas mexicanas y comparar la actividad de dicho contaminante con la radiactividad del ^{40}K ($t_{1/2} = 1.28 \times 10^9$ años) natural, mediante espectrometría gamma. Finalmente, la actividad específica de ^{137}Cs observada en las muestras FM4, FM5 y FBC es respectivamente de 0.7, 0.8 y 0.3 Bq/kg. Los límites establecidos en CODEX-STAN-193-1995 para el ^{137}Cs son de 1000 Bq/kg, por lo que todas las muestras cumplen con la recomendación. Su presencia ahora en vegetales resulta de suficiente interés como para ser conocida y considerada en un futuro cercano para medir el posible efecto que podría tener la contaminación radiactiva después de casi 80 años de la segunda guerra mundial, en México, donde no se ha realizado ninguna prueba nuclear, ni ha ocurrido algún accidente nuclear.

INTRODUCCIÓN

Clasificación y Composición de la Fresa

La fresa o frutilla, es de tipo herbáceo y perenne, pertenece al género de plantas rastreras estoloníferas de la familia *Rosaceae*, que incluye más de 2 mil especies de plantas herbáceas, arbustos y árboles, distribuidos en las regiones templadas de todo el mundo. La fresa es una planta de tallos rastreros, nudosos y con estolones; hojas grandes, trifoliadas, pecioladas y blancas por el envés (Gómez, 2015).

A continuación, se describen las principales estructuras de la planta de fresa que aparecen en el diagrama de la Figura 1.

- Estolón: Es un brote delgado, largo, que se forma en el suelo a partir de las yemas axilares de las hojas situadas en la base de la corona. En su extremo se forma una roseta de hojas, en contacto con el suelo emite raíces, originando una nueva planta con idénticos caracteres que la planta madre.
- Flores: La flor es de simetría radial con un grueso receptáculo que se hipertrofia después de la fecundación y se convierte en el fruto. Son de color blanco-rosado, largas y son polinizadas por insectos, abejas y el viento.

- Fruto: Denominado botánicamente pseudocarpo, es un conjunto de aquenios sobre un receptáculo carnoso que constituye la parte comestible.
- Hojas: Aparecen en roseta y se insertan en la corona. Son pinnadas o palmeadas, subdivididas en tres foliolos, de bordes aserrados, tienen estípulas en su base y su espesor varía según la variedad, son de color verde intenso.
- Inflorescencia: Agrupaciones de flores estructuradas de formas muy diversas.
- Tallo o corona: En él se ubican las yemas vegetativas y florales, donde nacen las hojas, estolones o guías y las inflorescencias.

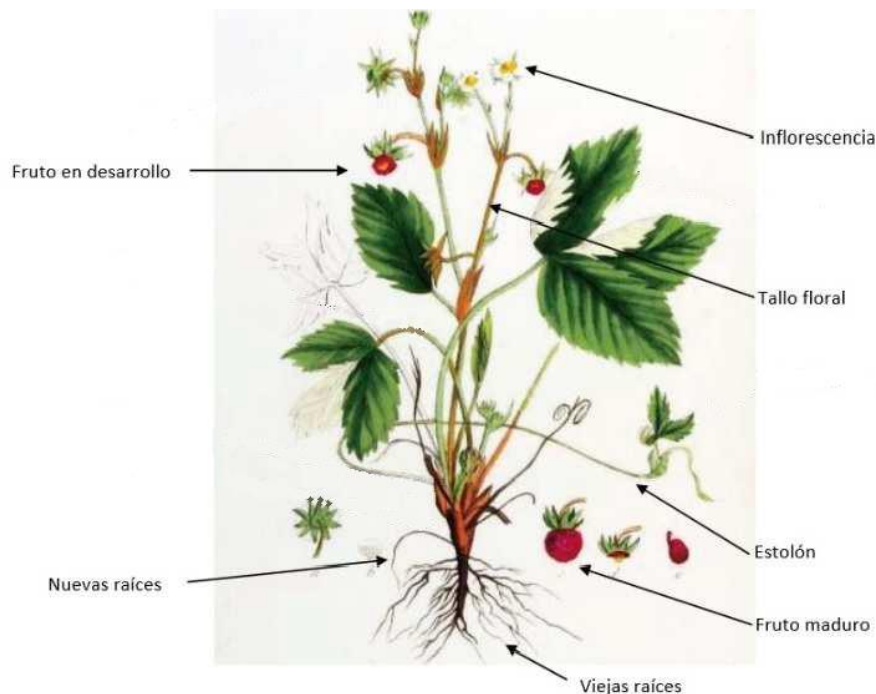


Figura 1. Esquema de estructuras en la planta de fresa (Gómez, 2015)

En México, la fresa se cultiva desde mediados del siglo pasado; en 1950 comenzó a exportarse a Estados Unidos (FPS, 2008). Se tienen documentadas más de mil variedades de fresa. El fruto es de forma cónica a casi redonda, de color rojo brillante o rojo anaranjado; presenta una carne perfumada, jugosa y mantecosa que se deshace en la boca a la mínima presión, con un sabor que varía: de ácido a muy dulce. Lo que más caracteriza a esta fruta es su intenso aroma.

Las variedades cultivadas comercialmente son por lo general híbridos, en especial *Fragaria ananassa* que resulta de la hibridación de las dos especies americanas en Europa hacia inicios del siglo XXVIII. En México se cultivan variedades como Carisma, Camino Real, Albión, Diamante, Aromas, Oso Grande y Camarosa (FPS, 2008).

Tabla 1. Contenido nutrimental en 100g de fresas (USDA, 2022)

Nutrimento	Cantidad	Unidad
Agua	91.1	G
Proteína	0.64	G
Lípidos	0.22	G
Carbohidratos		
Azúcares	5.34	G
Fibra	1.8	G
Minerales		
Calcio	12	Mg
Hierro	0.28	Mg
Magnesio	11.8	Mg
Fósforo	20	Mg
Potasio	89	Mg
Sodio	10	Mg
Zinc	0.18	Mg
Vitamina C	56	Mg

Mercado Nacional e Internacional de la Fresa

De acuerdo con información de SAGARPA en 2018, la demanda nacional se satisface al 100% con la producción interna, el 52% restante de la producción se destina al mercado externo, en la Figura 2 se observa la distribución en miles de toneladas (Mt).

Para 2019, México se convirtió en el principal proveedor de fresa a nivel mundial, según datos mostrados en la Figura 3, del Observatorio de Complejidad Económica (OEC, 2021), con el 25% de las exportaciones, que representaron 726 millones de dólares.

La fresa mexicana representa el 90.3% de las importaciones recibidas en Estados Unidos. Además, este cultivo ha adquirido reconocimiento en productos agroindustriales, principalmente para la fabricación de mermeladas, la mermelada de fresa representa el 85% de las mermeladas comercializadas a nivel nacional.



Figura 2. Esquema de distribución de la producción nacional de fresa (SAGARPA, 2018)

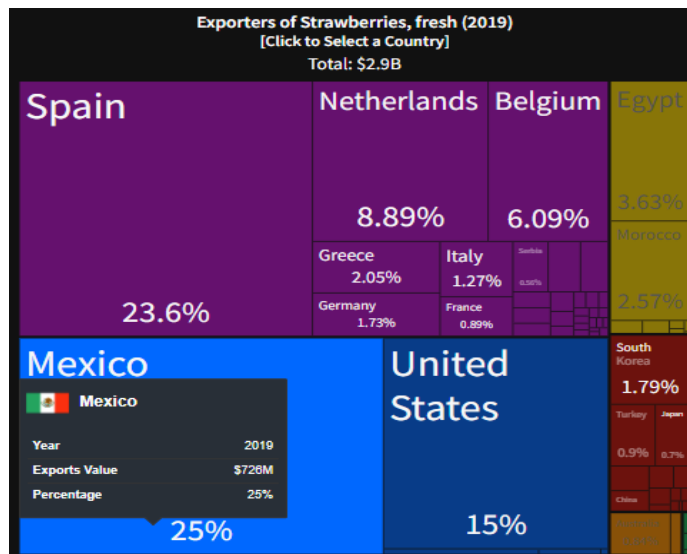


Figura 3. Países exportadores de Fresa en 2019 (OEC, 2021)

Propiedades del Cs

El Cs es un elemento natural en su forma estable. El granito contiene una concentración promedio de Cs de aproximadamente 1 ppm, los sedimentos rocosos contienen aproximadamente 4 ppm (ATSDR, 2016). El Cs metálico puro es de color blanco-plateado y es muy blando, que reacciona violentamente con el aire o con el agua, produciendo una explosión. Los compuestos de Cs no reaccionan violentamente con el aire o con el agua y son muy solubles en agua. La fuente principal de Cs comercial es un mineral conocido como polucita, que generalmente contiene aproximadamente de 5 a 33% de óxido de cesio (Cs₂O).

El Cs estable se usa para remover impurezas gaseosas de tubos al vacío y como revestimiento en filamentos de tungsteno o en tubos de rayos catódicos. El CsI y CsF cristalinos se usan en contadores de centelleo, que convierten energía de radiación ionizante en pulsos de luz visible para detectores de radiactividad y en espectroscopía. También se usa en relojes atómicos de alta precisión.

El ¹³⁷Cs como contaminante

Las formas de Cs radiactivas son producidas por la fisión del uranio en las barras de combustibles durante la operación normal de plantas nucleares o cuando se detonan armas nucleares. Los dos isótopos radiactivos más importantes del cesio son ¹³⁴Cs y ¹³⁷Cs.

Cada átomo de ¹³⁷Cs decae a ¹³⁷Ba. La vida media del ¹³⁷Cs es 30 años.

En Europa los impactos radiológicos del ¹³⁷Cs y ¹³⁴Cs liberados en el accidente de Chernóbil fueron inmensos. Entre estos se incluyen la dispersión en el ambiente y la incorporación en carne de renos, caribúes y el ganado, es decir, su consecuente integración a la cadena alimentaria. Desde mediados del siglo pasado se han realizado múltiples estudios sobre la absorción del ¹³⁷Cs en suelos, y actualmente se sabe que 85% del total se fija rápidamente, permitiendo solo que un 15% quede

disponible, para ser tomada por las plantas, por ejemplo (Butkus & Konstantinova, 2005). La mayor parte de la proporción enlazada probablemente será absorbida por micas y materiales arcillosos del suelo.

Decaimiento del ^{137}Cs

El ^{137}Cs decae a $^{137\text{m}}\text{Ba}$, esencialmente por decaimiento β^- , y son emitidos 0.662 MeV, aproximadamente el 94.4 % de los átomos son los que decaen. En un 5.6 % de los decaimientos emite β^- de 1.175 MeV. En la Figura 4 se ilustra el proceso de decaimiento.

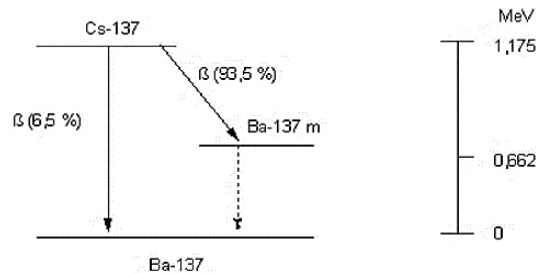


Figura 4. Esquema de decaimiento del ^{137}Cs (Lizarraga, 2006)

Efectos en la salud

Cuando una sustancia se libera, esta entra al ambiente, los seres humanos pueden estar expuestos al inhalar, comer o beber dicha sustancia, o por contacto con la piel. La radiación cósmica del espacio y los elementos radiactivos presentes en el suelo, constituyen fuentes naturales de radiación. La exposición a radiación externa puede deberse a fuentes de radiación naturales o artificiales. Algunas fuentes artificiales incluyen productos de consumo doméstico, equipo industrial, residuos atmosféricos radiactivos de bombas atómicas, y en menor grado desechos y dispositivos médicos y reactores nucleares.

La exposición a cantidades grandes de Cs radiactivo puede dañar las células del cuerpo a causa de la radiación emitida. En caso de exposición a altas cantidades, se puede sufrir el síndrome de radiación agudo que incluye náusea, vómitos, diarrea, hemorragia, coma y aun la muerte en el caso de exposiciones muy altas.

La exposición al Cs radiactivo afectará adversamente dependiendo de diferentes factores como la dosis, el tiempo de exposición y la vía de exposición con esta sustancia. El daño al ácido desoxirribonucleico (ADN) en el núcleo es el principal evento por el cual la radiación causa daño a largo plazo a los órganos y tejidos del cuerpo (Charles, 2000).

Propiedades del K

El potasio es un metal alcalino de color blanco-plateado, que abunda en la naturaleza en los elementos relacionados con el agua salada y otros minerales. Se oxida rápidamente en el aire, es muy reactivo, especialmente en agua, y se parece químicamente al sodio. El potasio metal se usa en células fotoeléctricas, fertilizantes, fabricación de pólvora y el cromato y dicromato en pirotecnia.

El ion K^+ está presente en los cromosomas, el ion hexahidratado estabiliza la estructura del ADN y del ARN compensando la carga negativa de los grupos fosfato.

La bomba de sodio es un mecanismo por el cual se consiguen las concentraciones requeridas de iones K^+ y Na^+ dentro y fuera de la célula para posibilitar la transmisión del impulso nervioso.

Es uno de los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, participa en relaciones hídricas, balance de cargas (con NO_3^- , por ejemplo), presión osmótica, e incluso en la fotosíntesis. Es común encontrarlo en análisis radiológicos, debido a su isótopo ^{40}K , pero también, guarda una estrecha relación con el ^{137}Cs , ya que el mecanismo de absorción de Cs por la raíz es similar al mecanismo de absorción del K, siguiendo una cinética de Michaelis-Menten (Nakanishi & Tanio, 2016). Ambos se absorben como cationes monovalentes, por ello se les conoce como análogos químicos. Así mismo, el transporte de Cs se ha relacionado con transportadores de K, como la familia KUP/HAK/KT, la familia de transportadores de K^+ de alta afinidad, y canales de cationes independientes de voltaje (VICCs), por mencionar algunos (White, 2000).

INSTRUMENTACIÓN

Espectrómetro de Radiación Gamma Con Detector De Centelleo NaI(Tl)

Se utilizó un equipo de centelleo de ioduro de sodio con trazas de talio, tipo pozo Bicron de 3x3 marca Labtech, con blindaje de plomo marca Mymssa, mostrado en la Figura 5.

El procesamiento de los resultados se realizó en una computadora la cual cuenta con el programa de detección radiactiva Maestro-32 Software versión 6.0 A65-B32 1997 de ORTEC.

El detector NaI(Tl), mostrado en la Figura 6, consiste en un cristal de yoduro de sodio activado con talio acoplado ópticamente al fotocátodo de un tubo fotomultiplicador.

La radiación γ ingresa al detector e interactúa provocando la ionización del yoduro de sodio. Esto crea estados excitados en el cristal que se desintegran al emitir fotones de luz visible. Esta emisión se denomina centelleo, por lo que este tipo de sensor se conoce como detector de centelleo. El número de fotones de luz visible es proporcional a la energía depositada en el cristal por la radiación γ .



Figura 5. Espectrómetro de radiación gamma con detector de centelleo con blindaje de plomo y computadora (Facultad de Química).

En el fotocátodo, los fotones de centelleo liberan electrones a través del efecto fotoeléctrico. El número de fotoelectrones producidos es proporcional al número de fotones de centelleo, que, a su vez, es proporcional a la energía depositada en el cristal por la radiación.



Figura 6. Área del Detector de centelleo (NaI(Tl))

El resto del tubo fotomultiplicador, que parece en la Figura 7, consta de una serie de dínodos encerrados en el tubo de vidrio evacuado, cada uno polarizado a un voltaje más alto que el anterior por un suministro de alto voltaje y una escalera de polarización resistiva en la base del tubo fotomultiplicador. A medida que cada electrón golpea el primer dínodo, el electrón adquiere suficiente energía cinética para eliminar de 2 a 5 electrones secundarios que son atraídos al siguiente dínodo por el voltaje más positivo en el siguiente dínodo, la salida del último dínodo se recoge en el ánodo. Para cuando la avalancha de carga llega al ánodo, el número de electrones se ha multiplicado por un factor que va de 10^4 a 10^6 . La carga que llega al ánodo es proporcional a la energía depositada por la radiación en el centelleador.

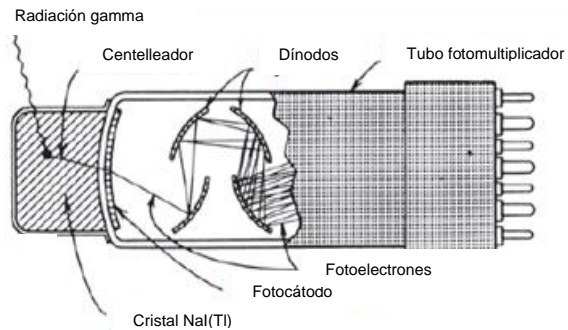


Figura 7. Diagrama general de un detector centelleo y sus partes (Loveland, 2017)

El preamplificador recoge la carga del ánodo en un condensador, convirtiendo la carga en un pulso de voltaje que transmite a larga distancia al amplificador de apoyo. El analizador multicanal mide las alturas de pulso emitidas por el amplificador y las ordena en un histograma para registrar el espectro de energía producido por el detector NaI(Tl).

Espectrómetro de Radiación Gamma Con Detector De Germanio Hiperpuro (HPGe)

El detector de HPGe usado se muestra en la Figura 8, este espectrómetro traduce la radiación ionizante en corriente de electrones que, mediante un arreglo de capacitores y resistencias, producen pulsos eléctricos que se envían al preamplificador.

El detector se conecta con un criostato que contiene nitrógeno líquido ($-195\text{ }^{\circ}\text{C}$) para mantenerlo a baja temperatura durante el procedimiento. Un Dewar protege el criostato, es la parte externa que se puede manipular para colocar el nitrógeno

líquido. En la parte superior posee una coraza o blindaje de Plomo, en donde se coloca el recipiente plástico que contiene las muestras.

En este caso se usa un analizador de pulsos multicanal (16 mil canales).

El multicanal hace un histograma de frecuencias del tamaño de los pulsos, con ello es posible hacer una correlación entre el tamaño del pulso contra la energía que lo produjo, entonces el histograma obtenido por el multicanal se convierte en un espectro de energía de las radiaciones que incidieron en el detector.

A continuación, se describen las partes que componen el sistema electrónico:

- Fuente de poder: Tiene como función alimentar voltaje al sistema electrónico para su operación.
- Fuente de alto voltaje: Se encarga de regular el voltaje que llega al detector. Es capaz suministrar hasta 5000v, siendo el voltaje utilizado de 2800v \pm 0.1%.
- Preamplificador: Ayuda a acoplar los pulsos eléctricos que recibe del detector, para enviarlos al amplificador, mejorando la calidad del análisis y reduciendo el ruido.
- Amplificador: aumenta el tamaño de la señal recibida del preamplificador antes de enviarla al multicanal
- Analizador multicanal: Clasifica la señal recibida según su amplitud, entre los 16,000 canales que lo conforman. Para ello ordena y cuenta los pulsos que fueron amplificados. La amplitud es proporcional a la energía, y la altura está en el intervalo 0-1 volts.

Detectores de Radiación

En comparación con los detectores NaI(Tl), la resolución de energía con los detectores HPGe es mejor. Este aumento drástico en la resolución compromete la eficiencia. La eficiencia se refiere a la relación entre la señal del detector y la cantidad de radiación gamma que emite una fuente. Las diferencias en los espectros obtenidos con ambos equipos se pueden observar en la Figura 9.

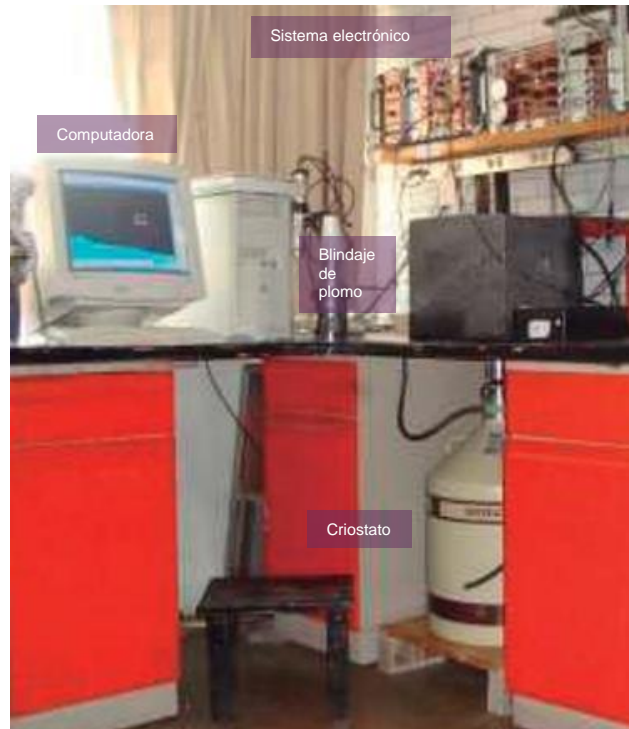


Figura 8. Fotografía del equipo de espectrometría y con detector HPGe (Instituto de Física, UNAM)

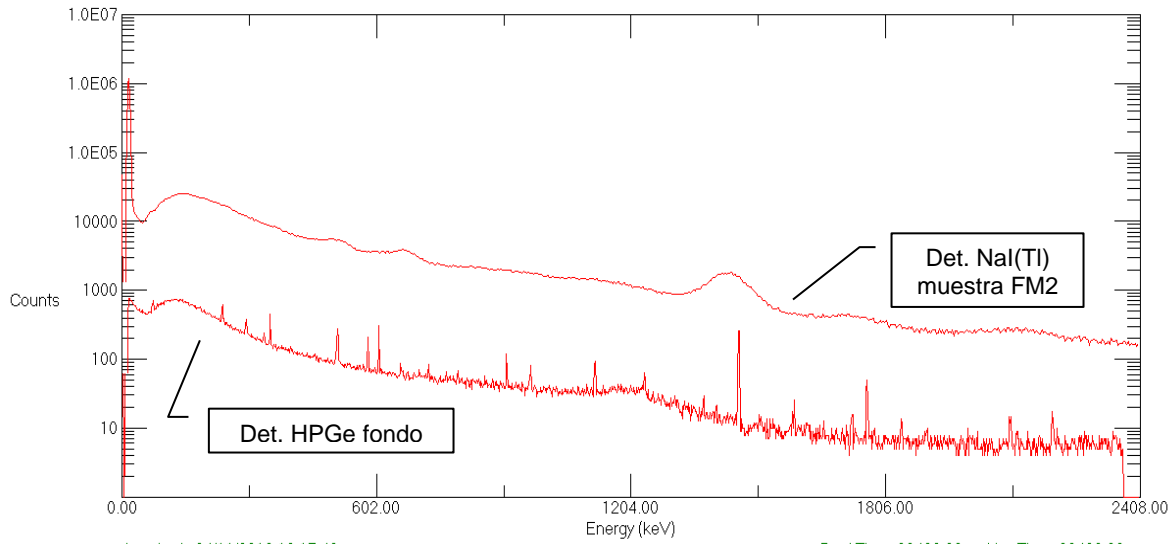


Figura 9. Comparación de espectro obtenido con detector de centelleo NaI(Tl) (FM2) y con detector semiconductor HPGe (fondo)

METODOLOGÍA

Análisis con Detector de centelleo NaI(Tl)

- Preparación de muestras: en esta sección se analizaron 2 muestras de Michoacán (FM4 y FM5) y 1 de Baja California (FBC), se lavaron con agua y se homogenizaron, la masa se pesó al ser transvasadas a contenedores Marinelli de 500ml, por lo que se usó tanta cantidad de muestra como fuera necesaria para ese volumen. Se desconoce la variedad a la que corresponden las muestras.
- Calibración: Para la calibración del equipo se utilizó una mezcla homogénea de radionúclidos estándar certificada (EG-ML 733-99 Isotope Products Laboratories, Burbank, Cal, USA, 91504).
- Eficiencia: Para la determinación de la eficiencia de detección se utilizó un estándar de actividad específica conocida de KCl (Potassium Chloride Sigma P9541-500g) preparado en el laboratorio. El valor de eficiencia calculado para el ^{40}K fue de 2.9% y para el ^{137}Cs de 5.6 %.

Para calcular la eficiencia se usa la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\text{cuentas}_{std} - \text{cuentas}_f}{A_K A_g m_{estandar} t} \times 100$$

Donde:

cuentas_{std} : son las cuentas obtenidas del estándar de KCl

cuentas_f : corresponden al fondo detectado

A_K : es la actividad específica del potasio 40 (31.19 Bq/g)

A_g : es el porcentaje de emisión de radiación gamma del ^{40}K (11%)

$m_{estandar}$: masa del estándar (610 g)

t : tiempo de detección (3600 s)

Calculo de la Actividad del ^{40}K y Concentracion Total de K en las muestras

Para conocer la actividad de potasio en las muestras, se necesita conocer la actividad del radioisótopo por gramo del K elemental que contienen, con la ley de decaimiento se obtiene la cantidad de núcleos de ^{40}K presente (A):

$$A = \lambda N$$

Se sustituye la constante de decaimiento como:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

Entonces se reescribe la ley de decaimiento:

$$A = \frac{N \ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0.693 N}{t_{1/2}}$$

La abundancia isotópica del ^{40}K es de 0.0118%, 39.1g es la masa atómica del K y 6.02×10^{23} el número de Avogadro, por lo que la cantidad de núcleos por gramo de K elemental (N) está dada por:

$$N = 1gK \left(\frac{1mol K}{39.1g K} \right) \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ átomos K}}{1mol K} \left(\frac{0.0118 \text{ } ^{40}\text{K}}{100 K} \right) = 1.18 \times 10^{18} \text{ } ^{40}\text{K}/K$$

La vida media del ^{40}K es 1.26×10^9 años, expresado en segundos sería:

$$1.2 \times 10^9 \text{ años} \times \frac{365d}{1año} \times \frac{24h}{1d} \times \frac{3600s}{1h} = 3.97 \times 10^{16} s$$

Por lo tanto, al sustituir los valores en la fórmula de actividad se obtiene :

$$A = \lambda N = \frac{N \ln 2}{t_{1/2}} = \frac{(1.18 \times 10^{18} \text{ } ^{40}\text{K}/gK)(0.693)}{3.97 \times 10^{16} s} = 31.685 \text{ dps}/gK = 31.685 \text{ Bq}/g K$$

La actividad se expresa en desintegraciones por segundo (dps), o Becquerel (Bq). En este caso se refiere a la actividad del ^{40}K presente en la muestra, para calcular la actividad específica se usó la fórmula:

$$A_e = \frac{C_m - C_f}{E \text{dec}_\gamma W_M} = \frac{\text{dps}}{g} = \frac{\text{Bq}}{g \text{ de alimento}}$$

Donde:

C_m : cuentas de la muestra

C_f : cuentas del fondo

E: Eficiencia de detección para nuestro sistema, 2.9 % para ^{40}K y 5.6% para ^{137}Cs
 dec_γ : Decaimiento gamma en la actividad detectada, para el potasio solo el 11 % de los átomos de potasio decaen por captura electrónica emitiendo radiación de 1461 KeV.

W_M : Peso de la muestra

Para calcular el % de K en la muestra se utilizará la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{Ae}{A}\right) 100 = \% K \text{ en muestra}$$

Donde:

Ae: Actividad específica del alimento (Bq/g)

A: Actividad por gramo de potasio elemental = 31.685 Bq /gK

Análisis con Detector HPGe

- Preparación de muestras: en esta sección se analizaron 3 muestras de Michoacán (FM1 FM2, FM3) y 1 del Estado de México (FSM), se lavaron con agua y se pesaron 500g en balanza granataria. Se transvasaron a contenedores plásticos herméticos. Se desconoce la variedad a la que corresponden las muestras.
- Calibración: El sistema de análisis HPGe se calibró en energía mediante fuentes radiactivas ^{241}Am (60 keV), ^{137}Cs (662 keV), ^{60}Co (1173 y 1332 keV) y ^{40}K (1460 keV), siguiendo los protocolos Ortec-Maestro, manual A65-BW.
- Eficiencia: se determinó utilizando una fuente estándar multinúcleo certificada proporcionada por Isotope Products Laboratories (EE. UU.) y que contiene ^{137}Cs (662 keV), ^{60}Co (1173 y 1332 keV) y ^{40}K (1460 keV). Se utilizó para calcular las eficiencias ^{40}K y ^{137}Cs , con la misma ecuación de eficiencia para el detector NaI(Tl) El valor de eficiencia calculada es de 0.47% para ^{137}Cs y 0.25% para ^{40}K .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de contenido radiológico con detector de Germanio Hiperpuro

En la primera parte del análisis se determina el contenido radiológico de las muestras para identificar si algún contaminante radiactivo se encuentra en cantidades inusuales o si alguno de ellos es de origen artificial. Estos últimos se deben cuantificar, así como su actividad en el alimento, para constatar que se encuentren dentro de los niveles permitidos para ese elemento. En este caso se compara con la normativa internacional del CODEX-STAN-193-1995, que coincide con el reglamento de la Unión Europea y el de la FDA.

En el espectro que aparece en la Figura 10, correspondiente a la muestra FM1, se puede observar cómo sobresalen los fotopicos que corresponden a elementos del fondo y por supuesto, la considerable aportación de radiación cósmica. Ambos espectros reflejan contenidos similares, y ninguno de los contaminantes presentes en las muestras se encuentra por encima de los niveles del fondo o representa algún riesgo.

Para hacer la identificación de radioisótopos más clara, y conocer la aportación de la muestra, la Tabla 2 muestra la información del área bajo la curva de los fotopicos tanto en el fondo (ANF) como en la muestra (ANM) y la diferencia de áreas (ANT).

Adicionalmente, se presentan datos de una muestra proveniente del Estado de México para determinar su contenido radiológico en 2019. En ellos se encontró también ^{137}Cs en cantidades comparables con la muestra de Michoacán.

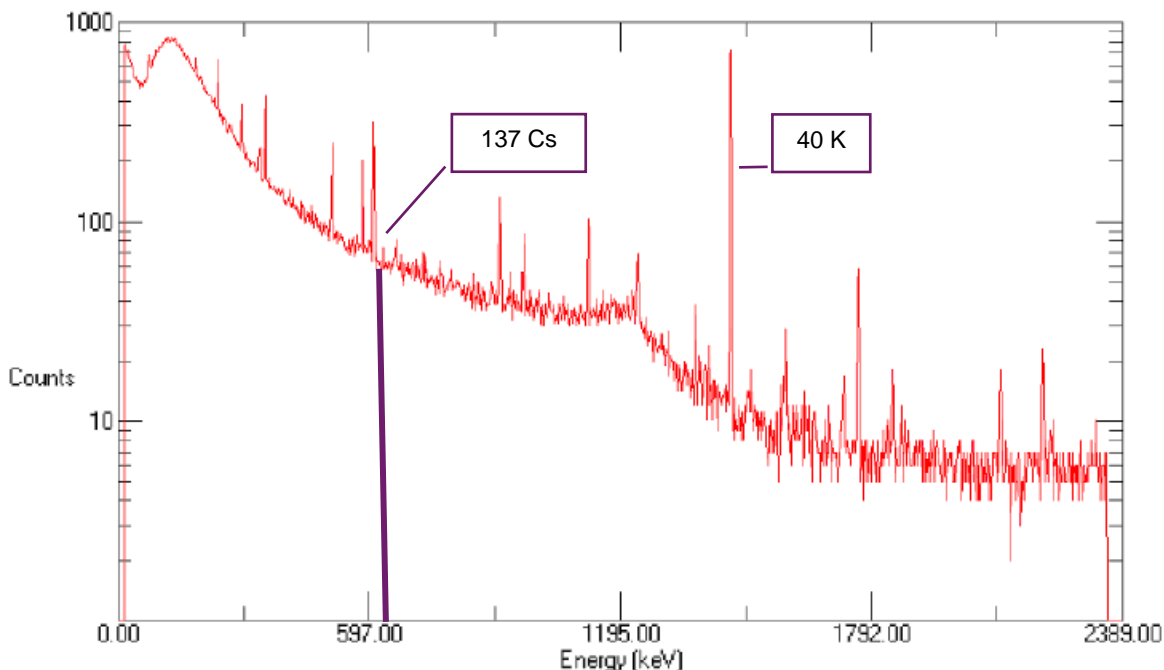


Figura 10. Espectro obtenido con detector semiconductor de muestra de fresas de Michoacán (FM1)

Tabla 2. Análisis comparativo de espectro de fondo y de fresas de Michoacán FM1, FM2 y FM3.

MUESTRA	ELEMENTO	ANF	ANFM	ANT	
FM1	Cs 137		168±42	168±42	P
	K 40	9619±113	2996±116	-7093±159	DDF
FM2	Cs 137		148±42	148±42	P
	K 40	9619±113	2912±115	-6707±158	DDF
FM3	Cs 137		191±41	191±41	P
	K 40	9619±113	2526±112	-7093±148	DDF
FSM	Cs 137		200±74	200±74	P
	K 40	9619±113	7117±125	-2502±169	DDF

DDF: dentro del fondo, P: presente

Con el análisis de áreas, se determinó el contenido radiológico de la muestra. Se encontraron radioisótopos naturales comparables con los presentes dentro del fondo, por lo que se denomina DDF.

Además de los elementos del fondo, se confirmó la presencia de ^{137}Cs , que es un contaminante artificial y producto de fisión. Este elemento no forma parte del fondo, y no es común encontrarlo en el territorio de Michoacán o de México en general. Por lo que se realiza un segundo análisis de fresas de la misma región en el detector de centelleo, para determinar la actividad y el contenido de ^{137}Cs .

Tabla 3. área neta y actividad específica de muestras analizadas con detector HPGe

MUESTRA	AREA NETA ^{137}Cs	$A_{^{137}\text{Cs}}$ (Bq/kg)	AREA NETA ^{40}K	$A_{^{40}\text{K}}$ (Bq/kg)
FM1	168±42	0.62	2996±116	39.23
FM2	148±42	0.55	2912±115	33.63
FM3	191±41	0.71	2526±112	28.02
FSM	200±74	0.74	2248±125	22.42

Una consideración importante para este hallazgo es la naturaleza de la muestra. Las plantas y hortalizas tienen su propio metabolismo, y la distribución o bioacumulación de nutrientes depende del tipo de alimento que se esté analizando, incluso dentro de una misma planta puede depender del tejido, tal y como demuestran otros estudios realizados en frutos del bosque y setas (Gwynn et al., 2013; Canbazoğlu & Dođru, 2013; Changizi et al., 2010; Tadaaki Ban-Nai et al., 2004). Por esa razón, este contaminante no se había encontrado en otros alimentos de México. Algún atributo fisiológico de la fresa ayuda a absorber mejor el ^{137}Cs y podría permitir la bioacumulación en el tejido de esta fruta (Guillaume et al., 2012). Existe relación en las vías de absorción de ^{40}K y ^{137}Cs observada en otras plantas (Kumar, 2008; Dragović et al., 2004; Panchal et al., 2011), en la Figura 11 se puede ver cierta relación inversa entre el ^{40}K y el ^{137}Cs . En el futuro se podría obtener un factor de transferencia para confirmar esa información.

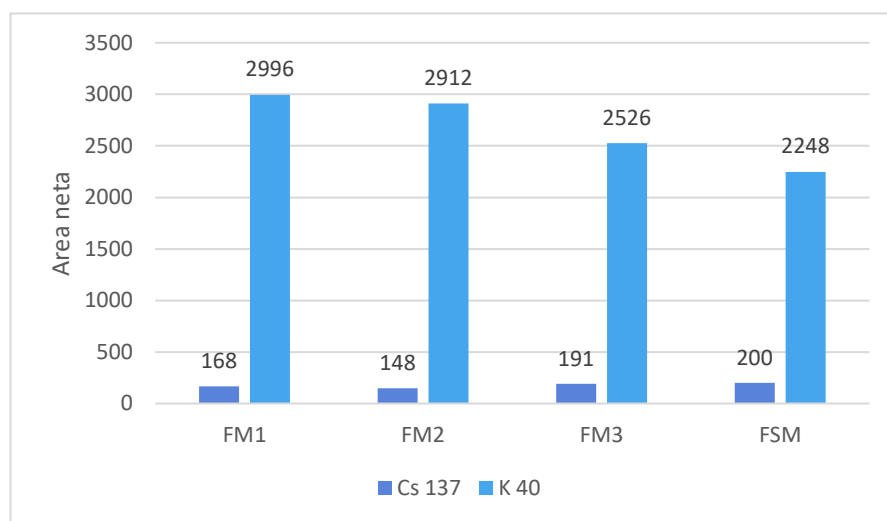


Figura 11. Grafica de área neta de ^{137}Cs y ^{40}K en muestras analizadas con detector HPGe.

Análisis de Actividad Específica con Detector de Centelleo

A continuación, la Figura 12 presenta el espectro de la muestra de fresas michoacanas FM4, obtenido con el detector de centelleo. En esta representación se puede conocer el intervalo de energía analizado, de 0-3489 keV.

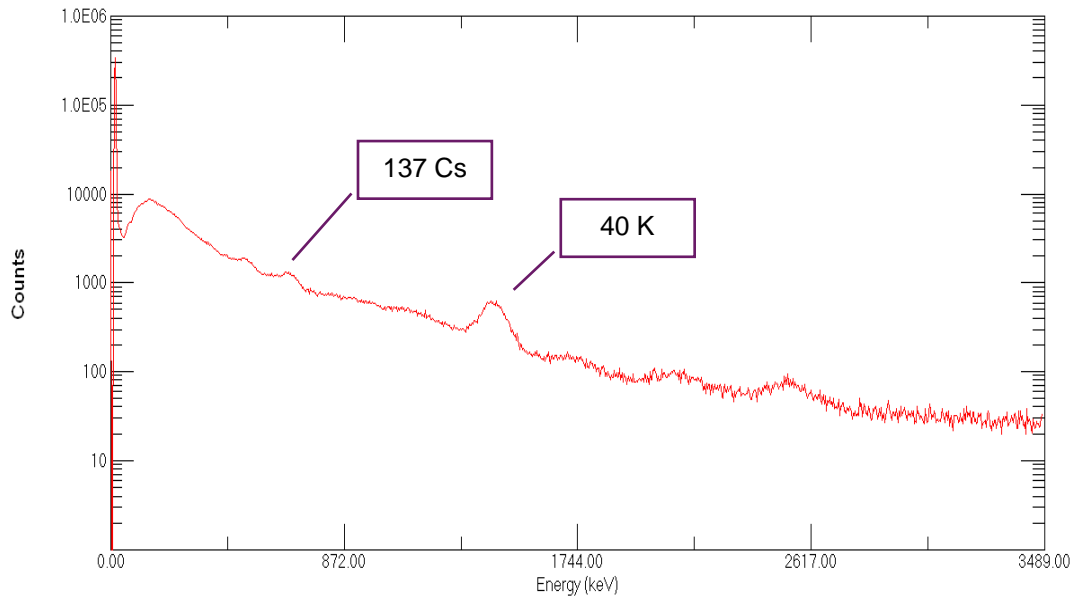


Figura 12. Espectro de muestra FM4 obtenido mediante detector de centello

En la Figura 13 se muestran los espectros en una escala apropiada y se señalan tanto los fotopicos en la región de energía del ^{137}Cs y del ^{40}K .

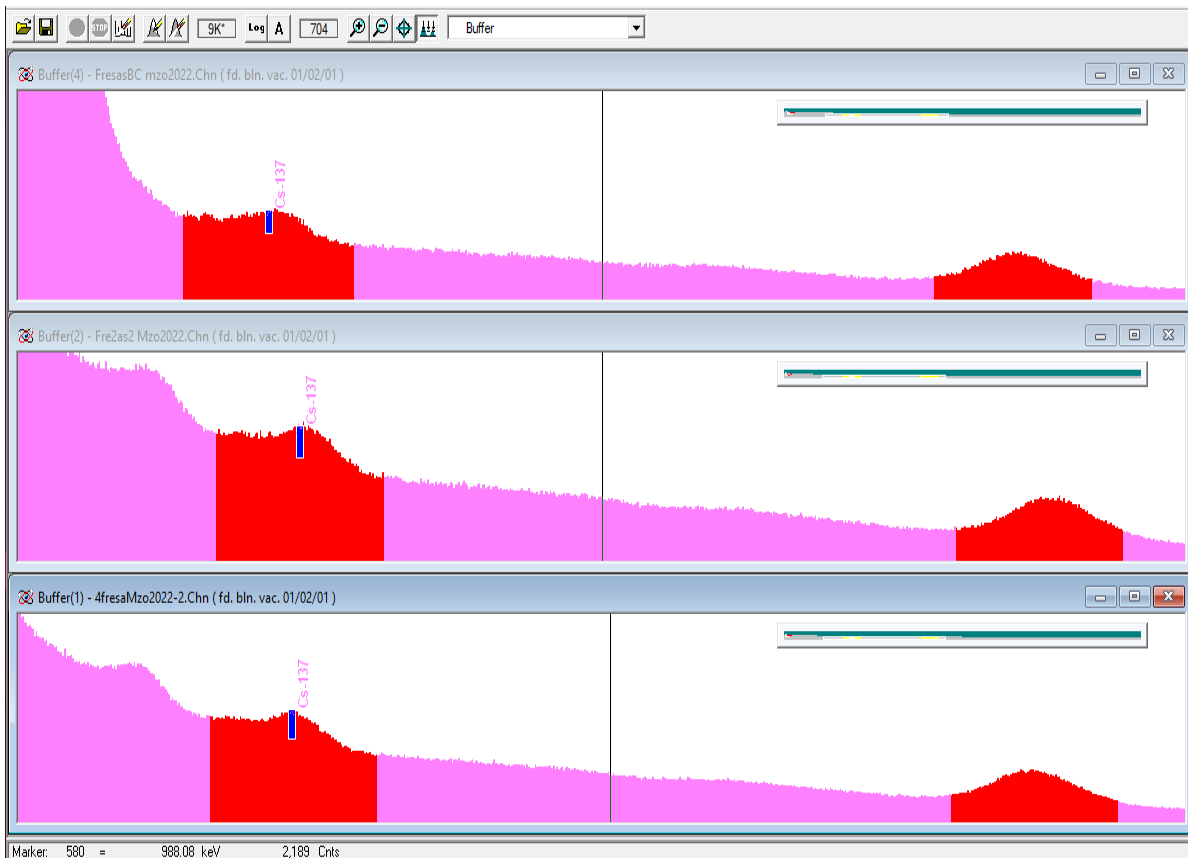


Figura 13. Espectros de muestras FM4, FM5 y FBC obtenidos con detector de centelleo, vistos desde MAESTRO con escala vertical automática y 704 canales en la horizontal.

Con esta representación se puede seleccionar la escala y la región que se desea observar, en este caso los 704 canales visibles están entre el 200 y el 900. Se marcó con color rojo la región que estadísticamente corresponde al fotopico, tanto del ^{137}Cs como del ^{40}K , para señalar su presencia. En todas las muestras se puede observar la presencia de un fotopico bien definido en la región de energía del ^{137}Cs , cercano a los 662keV. Igualmente se puede observar el fotopico correspondiente al ^{40}K en la región de 1461keV.

Con estos resultados se obtuvo la información necesaria, resumida en la Tabla 4, para conocer la actividad de ^{40}K y ^{137}Cs en las muestras. Los resultados se resumen en la Tabla 5.

Tabla 4. Información numérica de los espectros obtenidos con detector de centello

Muestra	Tiempo real (s)	Radioisótopo	Energía (KeV)	Cuentas
FM4	317,642.62	^{137}Cs	660.99	5204
		^{40}K	1461.67	1816
FM5	236,401.64	^{137}Cs	660.99	3759
		^{40}K	1461.67	1596
FBC	325,263.56	^{137}Cs	661.82	2207
		^{40}K	1461.39	1194

Determinación de actividad de ^{40}K y ^{137}Cs en las muestras

Para determinar la actividad de los elementos de interés, primero se calcula la actividad específica de potasio, por ejemplo en las muestras de fresa michoacana sería:

$$A_e = \frac{C_m - C_f}{Edec_\gamma W_M} = \frac{\frac{1816 \text{cuentas}}{317642.62 \text{s}}}{0.029(0.0118)369.9 \text{g}} = 0.045 \frac{\text{Bq}}{\text{g de alimento}}$$

El porcentaje de K en la muestra es

$$\left(\frac{A_e}{A}\right) 100 = \left(\frac{0.0045}{31.685}\right) 100 = 0.142 \% \text{ K en muestra}$$

Relativamente alto comparado con datos de la USDA.

En cuanto a la actividad del ^{137}Cs , el decaimiento se produce en 94.6% de los núcleos y la eficiencia del detector es de 5.6%, que se sustituye en la fórmula:

$$A_e = \frac{C_m - C_f}{Edec_\gamma W_M} = \frac{\frac{5204 \text{cuentas}}{317642.62 \text{s}}}{0.056(0.946)369.9 \text{g}} = 0.0008 \frac{\text{Bq}}{\text{g de alimento}}$$

La cantidad de núcleos que decaen en 1 gramo de ^{137}Cs es

$$N = \left(\frac{1 \text{mol}}{137 \text{g}}\right) \left(\frac{6.02 \times 10^{23} \text{núcleos}}{1 \text{mol}}\right) \left(\frac{94.6 \text{ dec}}{100 \text{ núcleos}}\right) = 4.157 \times 10^{11} \text{ dec/g } ^{137}\text{Cs}$$

Su actividad A

$$A = \lambda N = \frac{N \ln 2}{t_{\frac{1}{2}}} = \frac{(4.157 \times 10^{11})(0.693)}{948\,287\,520\text{s}} = 303.790 \frac{\text{Bq}}{\text{g } ^{137}\text{Cs}}$$

Con base en la información obtenida, el porcentaje de ^{137}Cs en la muestra es:

$$\left(\frac{A_e}{A}\right) 100 = \left(\frac{0.0008}{303.790}\right) 100 = 0.0002\% \text{ Cs en muestra}$$

De la misma forma se obtuvo la actividad de ^{40}K y ^{137}Cs en el resto de las muestras.

Tabla 5. Actividad de ^{40}K y ^{137}Cs en muestras analizadas

Muestra	Masa (g)	A_e ^{40}K (Bq/g)	K%	A_e ^{137}Cs (Bq/g)
FM4	369.9	0.045	0.142	0.0008
FM5	390.5	0.050	0.159	0.0007
FBC	410.0g	0.026	0.082	0.0003

La A_e de ^{137}Cs en la muestra puede ser comparada directamente con los límites máximos en las recomendaciones del CODEX Alimentarius, que se encuentran enlistados en la Tabla 6. Allí se puede ver que el nivel permitido de ^{137}Cs para alimentos es de hasta 1000 Bq/kg, mientras que las muestras evaluadas tuvieron valores de 0.7, 0.8 y 0.3 Bq/kg, por lo que se encuentran muy por debajo de los límites. Por otra parte, se debe considerar que los niveles de contaminación cercanos al límite solo son posibles en zonas donde ocurren accidentes nucleares o emergencias radiológicas.

Tabla 6. Lista de radionúclidos en alimentos y niveles de actividad permitidos (CODEX STAN 193-1995)

Alimento	Radionúclidos	Nivel en Bq/kg
Alimentos Para Lactantes	^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am	1
	^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{129}I , ^{131}I , ^{235}U	100
	^{35}S , ^{60}Co , ^{89}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{192}Ir	1000
	^3H , ^{14}C , ^{99}Tc	1000
Alimentos Para Otros Que Lactantes	^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am	10
	^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{129}I , ^{131}I , ^{235}U	100
	^{35}S , ^{60}Co , ^{89}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{192}Ir	1000
	^3H , ^{14}C , ^{99}Tc	10000

Al tratarse de elementos radiactivos, es posible conocer la actividad en cualquier momento con la ley de decaimiento, usando la muestra FM1 y suponiendo que la contaminación se produjo en 1945 se obtiene:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$
$$A_0 = \frac{A_e}{e^{-\lambda t}} = \frac{0.0008}{e^{-\frac{0.693}{30}(77)}} = 0.0047 \text{ Bq/g}$$

Lo cual sigue siendo una concentración muy por debajo de los límites. Así mismo se debe considerar la naturaleza de la muestra. Las plantas y vegetales tienen su propio metabolismo y la distribución o bioacumulación de nutrientes depende mucho del tipo de alimento que se está analizando, incluso dentro de una misma planta puede depender del tejido. Lo que en parte, ayuda a explicar por qué esta contaminación no había sido encontrada en otros alimentos.

Presencia de ¹³⁷Cs en México

Finalmente, la información histórica del sitio de pruebas nucleares ubicado en el estado de Nevada, EEUU., señala que se realizaron más de 900 pruebas. Otros eventos radiológicos cercanos no podrían haber tenido tales repercusiones, incluso si ocurrieron a distancias similares como son:

- Océano Pacífico: varias pruebas nucleares francesas.
- Trinity Site, New Mexico, EEUU: sitio de prueba de la primera arma nuclear 16/07/1945.
- Carlsbad, New Mexico: sitio de una prueba
- Green Valley, Colorado: sitio de una prueba
- Rifle, Colorado: sitio de una prueba
- Hattiesburg, Mississippi: sitio de varias pruebas
- Open Sea, South Atlantic Ocean: prueba de 3 propulsores nucleares en 1958

La ubicación aproximada de estos y otros eventos alrededor del mundo se puede consultar en mapas como el que se presenta a continuación:



Figura 12. Mapa de zonas de prueba en América, Europa, África y parte de Asia (Atomic Archive, 2022)

La forma en la que el contaminante ha viajado casi 3,000km de distancia del sitio de pruebas, se puede asociar a las precipitaciones, que a su vez se ve afectado por el movimiento de los vientos en estos territorios. Al norte de México se mueven principalmente los denominados vientos alisios o trade winds, que van de noreste a suroeste a esa distancia del ecuador. Esta migración de los contaminantes es una de las razones por las cuales el análisis de contenido radiológico es obligatorio también, para los países vecinos a un evento radiológico. Por ejemplo, un estudio realizado en Noruega, para medir la contaminación en moras y hongos silvestres, obtuvo actividades de ^{137}Cs entre 7 y 35 Bq/kg, a una distancia aproximada de 2,500km de Chernóbil (Gwynn, 2013). Un ejemplo más reciente, es la zona de Fukushima, donde los suelos contienen hasta 5,000Bq/kg, mientras que el arroz, gracias a su baja acumulación de Cs, contiene entre 5 y 25 Bq/kg (Nakanishi, 2016).

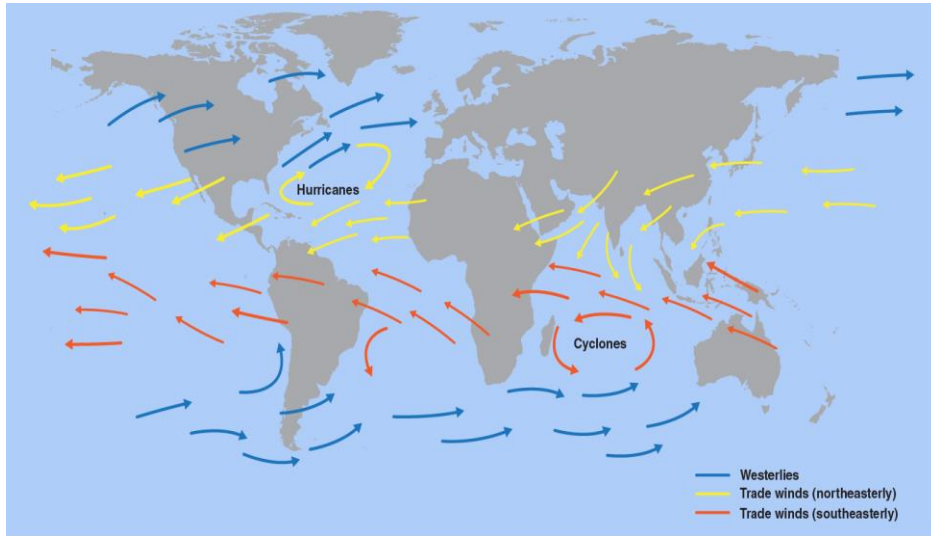


Figura 13. Vientos predominantes en el mundo hecho por NASA/JPL-Caltech (NOAA SciJinks – All About Weather, 2022)

Así mismo, las precipitaciones en América del norte se pueden observar en mapas que se actualizan en tiempo real, y éstas coinciden con el movimiento de los vientos, aunque pueden cambiar de dirección. En este tipo de mapa, se puede ver la dirección de los vientos en la región de Norteamérica que comprende el presente estudio. Existen diferentes corrientes que bajan desde Nevada hasta el centro de México, donde se encuentra la mayoría de las regiones productoras.

CONCLUSIONES

- ③ Se determinó la actividad específica de ^{40}K en las muestras, siendo de 0.045, 0.050 y 0.026 para fresas de Michoacán (FM4 y FM5) y fresas de Baja California (FBC)
- ③ El contenido total de K en las muestras fue de 142,159 y 82 mg/100g en FM4, FM5 y FBC respectivamente
- ③ Se identificó la presencia de ^{137}Cs en Fresas cosechadas en diferentes regiones de México
- ③ La actividad específica del ^{137}Cs presente se encuentra entre 0.0007, 0.0008 y 0.0003 Bq/kg en FM4, FM5 y FBC respectivamente
- ③ Los límites establecidos en el CODEX-STAN-193-1995 para ^{137}Cs son de 1000 Bq/kg, por lo que todas las muestras cumplen con la recomendación
- ③ La presencia de ^{137}Cs en alimentos producidos en México es consecuencia de eventos radiológicos en el país vecino; sin embargo, no representa un problema de inocuidad alimentaria y el riesgo para la población expuesta es mínimo

ANEXO 1 GLOSARIO

Actividad: Es el número de núcleos que se desintegran en la unidad de tiempo.

Átomo: La partícula más pequeña que en un elemento puede ser dividido sin perder sus propiedades químicas

Becquerel (Bq): equivale a 1 desintegración por segundo.

Canales: el analizador multicanal tiene una serie de pequeñas ventanas, denominadas canales; cada una de ellas acepta sólo los pulsos que poseen una altura determinada y los acumula. La información que se obtiene después de un cierto tiempo se traduce en un espectro de energías, que se construye haciendo una gráfica del número de cuentas acumulado en cada canal en función del número de este, es decir, la energía.

Constante de decaimiento: Es la probabilidad de que un núcleo decaiga en un instante de tiempo.

Decaimiento alfa (α): forma de desintegración radiactiva por la cual un núcleo atómico emite una partícula alfa y se convierte en un núcleo con cuatro unidades menos de número másico y dos unidades menos de número atómico.

Decaimiento beta (β): es un proceso mediante el cual un núclido inestable emite una partícula beta (un electrón o positrón) para compensar la relación de neutrones y protones del núcleo atómico.

Decaimiento gamma (γ): es un tipo de radiación electromagnética, y por tanto constituida por fotones, producida generalmente por elementos radiactivos o por procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón.

Decaimiento radioactivo: Es un proceso en el que un núcleo inestable se transforma en uno más estable.

Detector: dispositivo destinado a detectar la radiación electromagnética.

Isótopos: núclidos que tienen mismo número de protones, neutrones y masa.

Núclido: es un elemento que tiene un número de protones y neutrones definidos.

Partícula alfa (α): Está formada por dos neutrones y dos protones.

Partícula beta: Está formado por un electrón, positivo o negativo, emitido en la desintegración de un núcleo atómico.

Positrón: es una partícula elemental, antipartícula del electrón. Posee la misma cantidad de masa y carga eléctrica; sin embargo, ésta es positiva. No forma parte de la materia ordinaria, sino de la antimateria, aunque se producen en numerosos procesos radioquímicas como parte de transformaciones nucleares.

Producción de pares: proceso por el cual una partícula de energía suficiente crea dos o más partículas diferentes. Este proceso es característico de los aceleradores de partículas, donde se hacen colisionar partículas como electrones y positrones de muy alta energía apareciendo toda clase de partículas que desconocíamos anteriormente.

Protón: partícula subatómica con una carga eléctrica positiva.

Radiación gamma: radiación electromagnética emitida durante una desexcitación nuclear, es extraordinariamente penetrante.

Radiación ionizante: Es una forma de energía electromagnética capaz de producir iones en los átomos de la materia con la cual entra en contacto.

Radiación: energía o partículas materiales que se propagan a través del espacio.

Radioactividad: es propiedad de ciertos elementos químicos cuyos núcleos atómicos son inestables.

Vida media: Es el intervalo de tiempo necesario para el que el número de átomos de un núcleo inestable se reduzca a la mitad por desintegración espontánea.

REFERENCIAS

1. (ATSDR), A. p. (6 de Mayo de 2016). ATSDR. Obtenido de Resumen de Salud Pública: Cesio (Cesium): https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs157.html
2. Atomic Archive. (28 de 03 de 2022). atomicarchive.com. Obtenido de <https://www.atomicarchive.com/almanac/test-sites/testing-map.html>
3. Atomic Heritage Foundation. (Enero de 2021). Nevada Test Site. Obtenido de <https://www.atomicheritage.org/location/nevada-test-site>
4. Ban-Nai, T., Muramatsu, Y., & Yoshida, S. (2004). Concentrations of ^{137}Cs and ^{40}K in Mushrooms Consumed in Japan and Radiation Dose as a Result of Their Dietary Intake. *Journal of Radiation Research*, 45, 325-332. <https://doi.org/10.1269/jrr.45.325>
5. Butkus, D., & Konstantinova, M. (2005). Studies of ^{137}Cs Transfer in Soil-Fern System. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 13, 97-102. <https://doi.org/10.3846/16486897.2005.9636855>
6. Canbazoğlu, C., & Dođru, M. (2013). A Preliminary Study on ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs Activity Concentrations in Vegetables and Fruits Frequently Consumed by Inhabitants of Elazığ Region, Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295, 1245-1249. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1995-4>
7. Charles M. UNSCEAR report 2000: sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *J Radiol Prot.* 2001 Mar;21(1):83-6. doi: 10.1088/0952-4746/21/1/609. PMID: 11281539.
8. Changizi, V., Jafarpour, Z., & Naseri, M. (2010). Measurement of ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{137}Cs and ^{40}K in Edible Parts of Two Types of Leafy Vegetables Cultivated in Tehran Province-Iran and Resultant Annual Ingestion Radiation Dose. *Iranian journal of radiation research*, 8, 103-110.
9. Dragović, S., Nedić, O., Stanković, S., & Bačić, G. (2004). Radiocesium Accumulation in Mosses from Highlands of Serbia and Montenegro: Chemical and Physiological Aspects. *Journal of Environmental Radioactivity*, 77, 381-388. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.04.007>
10. Espinosa, G., Golzarri, J. I., & Navarrete, J. M. (2016). Determination of the Natural and Artificial Radioactivity of a Selection of Traditional Mexican Medicinal Herbs by Gamma Spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 307, 1717-1721. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4485-7>
11. Espinosa, G., Hernandez-Ibinarriaga, I., & Golzarri, J. I. (2009). An Analysis of the Potassium Concentrations of Soft Drinks by HPGe Gamma Spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 282, Article No. 401. <https://doi.org/10.1007/s10967-009-0139-y>
12. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (1995). CODEX-STAN-193-1995. Codex Alimentarius (pg. 41). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
13. FPS. (2008). Paquete tecnológico para la producción de fresa. Fundación Produce Sinaloa.
14. Gómez, L. E. (2015). Caracterización Del Sistema De Comercialización De La Fresa En Fresco En La Provincia De Soacha- Bogotá D.C. Universidad Militar Nueva Granada.

15. Guillaume, T., Chawla, F., Steinmann, P., Gobat, J.-M., & Froidevaux, P. (2012). Disparity in ^{90}Sr and ^{137}Cs Uptake in Alpine Plants: Phylogenetic Effect and Ca and K Availability. *Plant and Soil*, 355, 29-39. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1110-6>
16. Gwynn, J. P., Nalbandyan, A., & Rudolfsen, G. (2013). ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{40}K and ^{137}Cs in Edible Wild Berries and Mushrooms and Ingestion Doses to Man from High Consumption Rates of These Wild Foods. *Journal of Environmental Radioactivity*, 116, 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.08.016>
17. Kharzhevskaya, N. H. (2020). Dreamstime.com. Obtenido de Es.dreamstime.com: <https://es.dreamstime.com/ciclo-de-vida-una-planta-fresa-en-un-fondo-blanco->
18. Korobova, E., Brown, J., Ukrainseva, N., & Surkov, V. (2007). ^{137}Cs and ^{40}K in the Terrestrial Vegetation of the Yenisey Estuary: Landscape, Soil and Plant Relationships. *Journal of Environmental Radioactivity*, 96, 144-156. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.01.024>
19. Kumar, A. (2008). Impact of Tropical Ecosystem on the Migrational Behavior of ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th ^{238}U in Perennial Plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 192, Article No. 293. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9656-5>
20. Lizarraga, M. d. (2006). Determinación de la concentración de potasio en alimentos mediante la detección de las radiaciones emitidas por el ^{40}K . Ciudad de México: [Tesis de Licenciatura. Facultad de Química- Universidad Nacional Autónoma de México].
21. Loveland, W. (2017). *Modern Nuclear Chemistry*. New Jersey: John Wiley & Sons.
22. Martínez, T. (2009). Analysis of ^{40}K Concentration in Coffees and Their Infusions Using Gamma Spectroscopy with HPGe Detector. *INCS News*, 6, 52-56.
23. Nakanishi, T. M., & Tanoi, K. (2016). Agricultural implications of the Fukushima nuclear accident: the first three years (p. 263). Springer Nature.
24. Navarrete, J. M., Martínez, T., & Cabrera, L. (2007). Comparative Study between Radioactive Contamination in Powder Milk by Chernobyl Accident (^{137}Cs) and Natural Radioactivity (^{40}K). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 272, 277-279. <https://doi.org/10.1007/s10967-007-0515-4>
25. Navarrete, J., Campos, J., Martínez, T., & Cabrera, L. (2005). Determination of Potassium Traces in Foodstuffs by Natural ^{40}K Radiation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 265, 133-135. <https://doi.org/10.1007/s10967-005-0797-3>
26. Navarrete, M., Zuniga, M. A., Espinosa, G., & Golzarri, J. I. (2014). Radioactive Contamination Factor (RCF) Obtained by Comparing Contaminant Radioactivity (^{137}Cs) with Natural Radioactivity (^{40}K) in Marine Sediments Taken up from Mexican Sea Waters. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 4, 158-162. <https://doi.org/10.4236/wjnst.2014.43020>
27. NOAA SciJinks – All About Weather. (16 de 02 de 2022). Scijinks.gov. Obtenido de What Are Trade Winds?: <https://scijinks.gov/trade-winds/>
28. OEC. (3 de Diciembre de 2021). Which countries export? (2019). Obtenido de The Observatory of Economic Complexity: https://oec.world/en/visualize/tree_map/hs92/export/show/all/2081010/2019/
29. Panchal, R. H., Rao, D. D., & Mehta, B. H. (2011). Transfer of ^{137}Cs and ^{40}K from Agricultural Soils to Food Products in Terrestrial Environment of Tarapur, India. *Water, Air, & Soil Pollution*, 219, Article No. 429. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0718-0>
30. SAGARPA. (2016). Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Fresa Mexicana.
31. White, Philip & Broadley, Martin. (2000). Mechanisms of caesium uptake by plants. *New Phytologist*. 147. 241 - 256.