



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**“ANÁLISIS DE CONTAMINANTES RADIOLÓGICOS Y CONTENIDO DE
POTASIO EN HORTALIZAS (TOMATE VERDE Y PIMIENTO MORRÓN),
POR MÉTODOS NUCLEARES”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICA DE ALIMENTOS**

PRESENTA

DANIELA GUTIÉRREZ ZAVALZA



Ciudad de México, 2018



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: Arturo Navarro Ocaña**
VOCAL: **Profesor: Juan Diego Ortiz Palma**
SECRETARIO: **Profesor: Guillermo Cirano Espinosa García**
1er. SUPLENTE: **Profesora: Esmeralda Paz Lemus**
2° SUPLENTE: **Profesora: Tania Gómez Sierra**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: INSTITUTO DE FÍSICA,
UNAM. PROYECTO DE APLICACIONES DE DOSIMETRÍA. EDIFICIO VAN DE
GRAFF. LABORATORIO A-25.**

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Guillermo Cirano Espinosa García

SUSTENTANTE:

Daniela Gutiérrez Zavalza

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
CAPÍTULO PRIMERO: ASPECTOS FUNDAMENTALES DE QUÍMICA DE ALIMENTOS	4
1.1. ANTECEDENTES GENERALES	4
1.2. PRODUCCIÓN, COMERCIALIZACIÓN Y CONSUMO DE HORTALIZAS	5
1.2.1. TOMATE VERDE	5
1.2.1.1. Producción, comercialización y consumo de tomate verde	6
1.2.2. PIMIENTO MORRÓN	8
1.2.2.1. Producción, comercialización y consumo de pimiento morrón	10
1.3. POTASIO	13
1.3.1. INGESTA DIARIA RECOMENDABLE	13
1.3.2. TRASTORNOS PRODUCIDOS POR DEFICIENCIA DE POTASIO	14
1.3.3. TRASTORNOS PRODUCIDOS POR EXCESO DE POTASIO	15
1.3.4. POTASIO 40	17
1.4. LEGISLACIÓN	18
CAPÍTULO SEGUNDO: ASPECTOS FUNDAMENTALES DE FÍSICA DE RADIACIONES	22
2.1. ANTECEDENTES GENERALES	22
2.2. DECAIMIENTO RADIATIVO	22
2.2.1. UNIDADES	23
2.2.2. VIDA MEDIA	23
2.2.3 NÚCLIDO	24
2.2.3.1 Radioisótopos	24
2.3. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA CON LA MATERIA	26
2.4. FUENTES NATURALES Y ARTIFICIALES DE RADIACIÓN IONIZANTE	29
2.5. CADENAS DE DECAIMIENTO RADIATIVO DE RADIACIÓN NATURAL	29
2.6.1. EFECTOS EN LA SALUD	32
2.7. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE CONTENIDO RADIOLÓGICO	33
2.7.1. ESPECTROMETRÍA GAMMA	33
2.7.1.1. Detector de Germanio Hiperpuro	33
CAPÍTULO TERCERO: METODOLOGÍA	35
3.1. SELECCIÓN DE MUESTRAS	35
3.2. ESPECTRO DE FONDO	36
3.3. CALIBRACIÓN DE ENERGÍA	38

3.4. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	38
3.5. ESPECTRO DE LA MUESTRA	39
3.6. ANÁLISIS DE UN FOTOPICO	39
3.7. CONTENIDO RADIOLÓGICO EN LAS MUESTRAS	42
CAPÍTULO CUARTO: INSTRUMENTACIÓN	45
4.1. DETECTOR SEMICONDUCTOR DE GERMANIO HIPERPURO (HPGE)	46
4.1.1. BLINDAJE DEL DETECTOR	47
4.1.2. CONTENEDOR DE LA MUESTRA	47
4.2. SISTEMA ELECTRÓNICO	48
4.3. EQUIPO DE CÓMPUTO	49
CAPÍTULO QUINTO: RESULTADOS	51
5.1. ESPECTRO DE FONDO	51
5.2. CALIBRACIÓN DE ENERGÍA	52
5.3. ESPECTROS OBTENIDOS PARA LAS MUESTRAS	54
5.3.1. TOMATE VERDE	54
5.3.2. PIMIENTO MORRÓN.....	58
5.4. ANÁLISIS DE UN ESTÁNDAR DE POTASIO	66
5.4.1. EFICIENCIA DE CONTEO	66
5.4.2. CÁLCULO DEL CONTENIDO DE POTASIO EN UN ESTÁNDAR DE KCL	67
5.5. CONTENIDO DE POTASIO TOTAL EN LAS MUESTRAS	68
5.5.1. CÁLCULO DEL CONTENIDO DE POTASIO EN LAS MUESTRAS	68
5.5.2. TOMATE VERDE	69
5.5.3. PIMIENTO MORRÓN.....	70
CAPÍTULO SEXTO: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	71
6.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
6.2. CONCLUSIONES	73
ANEXOS	74
A.1. UNIDADES	75
A.2. GLOSARIO	75
BIBLIOGRAFÍA	78

INTRODUCCIÓN

La contaminación por elementos radiactivos artificiales y naturales en alimentos es debida a las situaciones de emergencia nuclear como son pruebas nucleares en la atmósfera, accidentes en plantas nucleares, desechos radiactivos y mal manejo de material nuclear, dispersándose a través del medio ambiente por suelos, agua y aire principalmente. Además de los residuos generados por la irradiación de alimentos como método de desinfección o conservación.

Después de los accidentes nucleares ocurridos en Three Mile Island, Estados Unidos (1979), en Chernobyl, Ucrania (1986) y recientemente en Fukushima, Japón (2011), se han reforzado los estándares de importación de productos alimenticios para garantizar la ausencia de radiación en los mismos. Por ello se recomienda realizar controles rutinarios a los alimentos que llegan al país, estimando riesgos por radiactividad potencial para la población y tomar medidas para reducir o eliminar riesgos.

Por estos motivos se ha dispuesto la creación de normatividades para alimentos que establecen los límites aceptables que garanticen la inocuidad y seguridad de estos. De hecho, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha establecido el Programa Internacional de Alimentos Seguros.

Actualmente se ha buscado que los alimentos consumidos por la población tengan un mayor contenido nutrimental, esto ha impulsado una amplia investigación acerca del contenido nutricional, la calidad de éstos, así como la carencia y exceso de nutrimentos en la dieta de los seres vivos.

La legislación alimentaria se aplica a todo el comercio de alimentos a fin de asegurar a los consumidores la calidad e inocuidad de los alimentos, proporcionando amplios márgenes de seguridad.

Dichas legislaciones no solo dan seguridad a los consumidores, sino que también proporciona los niveles de cuantificación que la industria alimentaria puede utilizar para evaluar si los productos cumplen con las especificaciones dadas.

Debido a que los cultivos se encuentran en contacto directo con la tierra, estas pueden absorber en sus raíces y cuerpo elementos radiactivos contaminantes como son el ^{239}Pu , ^{137}Cs , ^{134}Cs y ^{131}I . Los radioisótopos de cesio pueden provenir de derrames en reactores y el de estroncio puede provenir de explosiones nucleares.

Los alimentos pueden emitir radiación de manera natural al incorporar elementos radiactivos provenientes de la tierra. Los radioisótopos más frecuentes en alimentos son los radioisótopos producto del decaimiento de ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th y el ^{40}K .

De entre ellos el potasio 40 es el más común ya que los alimentos incluyen a este mineral como parte de su composición química, siendo la principal fuente de radiación interna en el cuerpo humano, aunque solo el 0.0118% del potasio elemental encontrado en los alimentos es radiactivo. (Espinosa, 2013)

Como ya se mencionó, el material radiactivo puede ser de suma importancia dependiendo la concentración en que se encuentre en el alimento y del tiempo de vida media que tenga el radioisótopo de interés. Si la vida media es corta (días, meses, pocos años) supondrá un problema si la concentración del radioisótopo es alta. Por otro lado, si la vida media es larga (cientos, miles de años) podría considerarse contaminación permanente.

Por ello, las cadenas de producción de alimentos deben asegurar que los niveles de radiactividad cumplan con los límites establecidos con base en las normativas nacionales e internacionales.

Es de suma importancia la medición de radioisótopos en alimentos debido a las posibles consecuencias para la salud a corto, mediano y largo plazo que puede traer el consumo de alimentos contaminados.

De ahí que el objetivo del presente trabajo es plantear un antecedente para la realización de un protocolo de detección de contaminantes radiológicos en alimentos a través de una técnica de espectrometría de radiación gamma utilizando como instrumento un detector de germanio hiperpuro.

Se elige este método debido a las ventajas que representa la obtención de un amplio espectro de radiación de una muestra en una lectura.

Las hortalizas analizadas son tomate verde (*Physalis ixocarpa*) y pimiento morrón (*Capsicum annuum* var. *annuum*), debido a que en nuestro país existe una importante producción de estos alimentos y la mayor parte es exportado, principalmente a Estados Unidos y Canadá.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar y cuantificar el contenido de elementos radiactivos artificiales y naturales en alimentos para consumo humano, en este caso tomate verde y pimiento morrón, debido a la importancia comercial de los mismos, así como la presencia de potasio 40 como mineral obtenido de forma natural y la importancia del potasio total en la nutrición.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Proponer el presente trabajo como parte del desarrollo de un protocolo para la cuantificación de contaminantes radiológicos por espectrometría de radiación gamma.
- Proponer un método para la cuantificación de potasio total en alimentos.
- Establecer las bases para la elaboración de un atlas de la distribución de contaminantes radiológicos por zona geográfica en México, en todo tipo de alimentos.
- Establecer un marco de referencia para posteriores evaluaciones, ya sea en caso de accidentes o en algunas otras alteraciones del medio ambiente.

CAPÍTULO PRIMERO: ASPECTOS FUNDAMENTALES DE QUÍMICA DE ALIMENTOS

1.1. Antecedentes generales

Los alimentos denominados hortalizas o verduras incluyen algunas frutas, hojas, raíces e inclusive tallos y flores.

Las hortalizas son una parte muy importante de la dieta. Casi todas son ricas en caroteno y vitamina C y contienen importantes cantidades de calcio, hierro y otros minerales. Su contenido de vitaminas del complejo B generalmente es bajo. Por lo general, suministran sólo un poco de energía y muy poca proteína. Una gran proporción de su contenido consiste en residuo no digerible, que agrega volumen o fibra a las heces. (FAO, 2002)

Estas se clasifican según sus partes comestibles, las cuales son:

- a. De raíz comestible: zanahoria, nabo, betabel, rábano
- b. De hoja comestible: apio, perejil, acelga, espinaca, col, lechuga
- c. De tallos y bulbos comestibles: cebolla, ajo, papa
- d. De flor comestible: coliflor, brócoli, alcachofa
- e. De frutos comestibles: tomate verde, pimiento morrón, pepino, berenjena, jitomate

Para fines de este trabajo se seleccionaron dos tipos de hortalizas: tomate verde y pimiento morrón, debido a la importancia en cuanto a su producción, comercialización y consumo en nuestro país, además de su composición química y sus aportes a la nutrición humana.

Como se muestra en la tabla 1, el valor nutricional de los frutos seleccionados radica en que son fuente importante de diversas vitaminas y minerales, además de contener una gran cantidad de fibra.

La composición química de las frutas y hortalizas depende de diversos factores de cultivo. Estos pueden ser la humedad, temperatura, luz, disponibilidad de minerales del suelo, además de la presencia de plagas. (Salunke, 1998).

Tabla 1. Contenido nutrimental de frutos seleccionados

Nutrimentos por 100 g de muestra	Tomate verde	Pimiento morrón
Agua (g)	93.0	93.9
Energía (kcal)	23.0	20.0
Carbohidratos (g)	5.10	4.60
Proteínas (g)	1.20	0.86
Lípidos (g)	0.20	0.17
Fibra dietética (g)	1.33	1.70
Vitamina B ₂ (mg)	0.04	0.20
Vitamina B ₃ (mg)	0.50	0.50
Vitamina B ₆ (mg)	0.10	0.20
Vitamina C (mg)	23.4	80.4
Vitamina E (mg)	0.38	0.37
<i>Potasio (mg)</i>	204.0	175.0
Calcio (mg)	13.0	10.0
Fósforo (mg)	28.0	20.0
Hierro (mg)	0.51	0.34
Magnesio (mg)	10.0	10.0
Sodio (mg)	13.0	3.00

1.2. Producción, comercialización y consumo de hortalizas

México cuenta con 198 millones de hectáreas de territorio nacional, de las cuales 22 millones están destinadas a la producción agrícola. México ocupa el tercer lugar en producción agropecuaria de América Latina México y el tercer lugar mundial como exportador de hortalizas, después de China y España, y aporta una de cada diez toneladas comercializadas en el mundo. (SIAP, 2013)

El sector hortícola presenta tasas de crecimiento positivas con un 12.6% de variación anual en cuanto a producción hasta 2017 y con un aumento del 21% respecto a 2012-2016, considerando a 13 hortalizas sobresalientes: jitomate, chile verde, cebolla, papa, zanahoria, calabacita y tomate verde, entre otras. (SAGARPA, 2017)

En México, los hábitos de consumo de hortalizas son variados y dependen directamente de costos y tradiciones de la sociedad.

1.2.1. Tomate verde

El tomate verde era conocido por los mayas y aztecas desde épocas prehispánicas, siendo México su centro de origen y domesticación. Es una fruta pequeña, esférica y verde o violácea rodeada por una envoltura papirácea formada por el cáliz. Cuando la fruta madura, rompe el

envoltorio adyacente, el cual es de color marrón. Los tomatillos son ampliamente utilizados como ingredientes de salsas verdes en varios países latinoamericanos. La frescura y verdor de las bayas es el principal criterio de selección.

El tomate verde también es conocido como tomate de cáscara, tomate de fresadilla, tomate milpero, tomatillo, miltomate (México, Guatemala), o simplemente tomate (en tal caso, el tomate rojo es llamado jitomate). (UDLAP–INSEEC, 2006)

El tomate verde (Tabla 2) tiene en México su centro de origen y diversificación; 1 de cada 5 especies es endémica de nuestro país. De estas especies, solo se había cultivado *Physalis ixocarpa*, aunque recientemente se ha encontrado el cultivo de *P. angulata*. El resto son silvestres.

Tabla 2. Clasificación taxonómica del Tomate Verde

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Género	<i>Physalis</i>
Especie	<i>ixocarpa</i>

Physalis es un género americano que se distribuye en Estados Unidos de América, México, Centroamérica, Sudamérica y las Antillas, su alta riqueza genética se expresa en la existencia de poblaciones silvestres, toleradas, fomentadas, cultivadas y domesticadas, asociadas a diferentes tipos de vegetación y condiciones ecológicas.

La especie más importante de tomate de cáscara desde el punto de vista comercial es *P. ixocarpa* Brot., también llamada *P. Philadelphica* Lam., ya que ocupa el quinto lugar en superficie sembrada con cultivos oléricos en México.

1.2.1.1. Producción, comercialización y consumo de tomate verde

En las últimas dos décadas esta especie se ha consolidado como una de las principales hortalizas en México y como un cultivo potencial en diferentes países de América y Europa, aún con dicha importancia, su cultivo se realiza con base en variedades nativas o criollas, por lo que es necesario generar variedades mejoradas cada vez de mayor rendimiento para abastecer la demanda de su fruto.

Entre las hortalizas en México, el tomate verde ocupa el quinto lugar en cuanto a superficie cultivada con 42 mil 639 hectáreas, distribuidas en 28 entidades del país, siendo los principales estados (Tabla 3):

Tabla 3. Principales entidades productoras (SAGARPA, 2017)

Posición	Entidad Federativa	Volumen (toneladas)	Variación 2015-2016 (%)
	Total Nacional	698,017	2.1
1	Sinaloa	118,439	-2.7
2	Zacatecas	84,805	6.6
3	Michoacán	55,028	-3.4
4	Puebla	54,696	7.3
5	Jalisco	53,272	-1.2
6	México	44,161	0.0
7	Sonora	44,077	38.0
8	Nayarit	38,402	-2.6
9	Tlaxcala	21,519	-8.5
10	Morelos	19,995	-13.5
	Resto	163,622	3.1

El tomate verde ha cobrado gran importancia en México en las dos últimas décadas.



Figura 1. Datos estadísticos de la producción del tomate verde en México. (SAGARPA-SIAP, 2017)

En cuanto al mercado internacional, el tomate verde se exporta a seis países, siendo Estados Unidos el principal comprador, además lo siguen países europeos como Alemania, España y Suiza (Figura 2).



Figura 2. Comercio exterior. (SAGARPA-SIAP, 2017)

En cuanto a su relación con la producción mundial (Figura 3), México aún no figura en los primeros cinco lugares, lista que es encabezada por Italia.

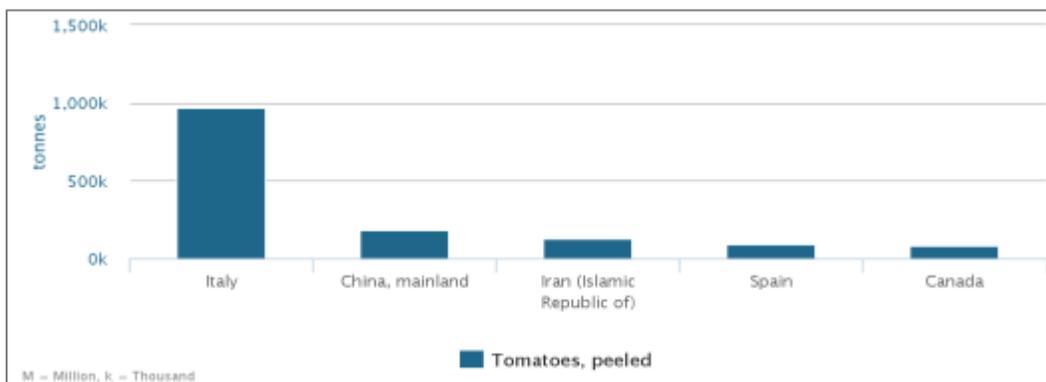


Figura 3. Principales productores de tomate verde en el mundo. (FAO, 2016)

1.2.2. Pimiento morrón

Los pimientos verdes se cultivan desde hace más de 5000 años, en Sudamérica y hace algo menos de tiempo en Centro América. Los colonizadores europeos llevaron este alimento a Norteamérica entre los años 1500 y 1600.

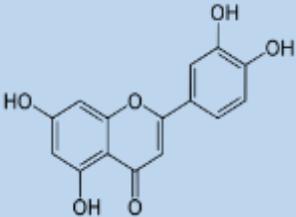
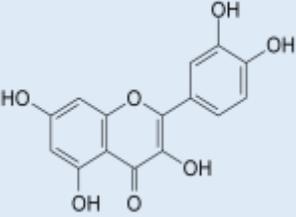
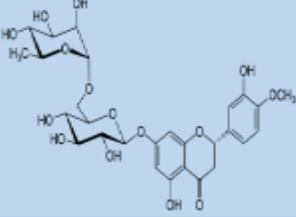
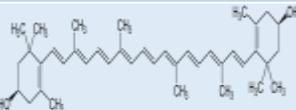
Debido a que los pimientos se pueden cultivar en una gran variedad de climas y son populares en las cocinas de todo el mundo, a menudo se pueden encontrar en pequeñas granjas de Norteamérica, Centroamérica, Sudamérica, Europa, África, Oriente Medio y en algunas zonas de Asia.

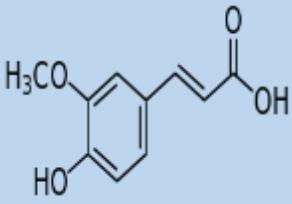
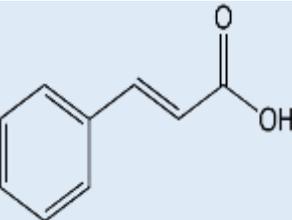
Los pimientos son una fuente significativa de antioxidantes. Aunque en la mayoría de los estudios de investigación se han centrado en los carotenoides como principales antioxidantes

del pimiento, este fruto nos ofrece una amplia gama de estos. En cuanto a los nutrientes convencionales, el pimiento es una excelente fuente de vitamina C (80.4 mg/100 g).

Entre los antioxidantes contenidos en los pimientos se encuentran los siguientes, por dar algunos ejemplos:

Tabla 4. Ejemplos de antioxidantes contenidos en el pimiento morrón

Grupo	Antioxidante	Estructura
Flavonoides	Luteolina	
	Quercetina	
	Hesperidina	
Carotenoides	α -caroteno	
	β -caroteno	
	Criptoxantina	
	Luteína	
	Zeaxantina	

Ácidos hidroxicinámicos	Ácido ferúlico	
	Ácido cinámico	

La concentración y contenido de los antioxidantes dependerá del estado de maduración del pimiento marrón, pasando del verde al rojo variando las condiciones de humedad y temperatura (verde, amarillo, anaranjado y rojo).

Es por ello que el chile es un fruto de gran relevancia en nuestro país, de entre ellos el género *Capsicum annum* es el más importante por la alta variabilidad en colores, formas, tamaños y sabores y se han reportado más de 60 tipos en México.

Tabla 5. Clasificación taxonómica del Pimiento Morrón

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Género	<i>Capsicum</i>
Especie	<i>annuum</i>
Variedad	annuum

1.2.2.1. Producción, comercialización y consumo de pimiento morrón

Según la FAO, de 2006 a 2009 son los años cuya producción de pimiento morrón ha sido significativa para el mercado mundial, con un 20% (Figura 5).

Hasta el año 2010, las principales entidades productoras eran los estados de Baja California, Baja California Sur, Jalisco, Morelos, Sinaloa (96%) y Sonora. (SIAP, 2010)

En el Atlas Agrolimentario 2017 de la SAGARPA, se agrupan alrededor de 50 variedades de chiles entre los que se encuentran habanero, jalapeño, poblano, pimiento morrón, serrano,

pasilla y guajillo, cuya cosecha representa el 20.6 por ciento de la producción nacional de hortalizas.

Tabla 6. Principales entidades productoras (chiles en general, incluido el pimiento morrón) (SAGARPA, 2017)

Posición	Entidad Federativa	Volumen (toneladas)	Variación 2015-2016 (%)
	Total Nacional	3,279,910	17.9
1	Chihuahua	991,917	21.5
2	Sinaloa	637,924	6.0
3	Zacatecas	419,323	70.6
4	San Luis Potosí	296,298	33.5
5	Sonora	164,061	25.9
6	Jalisco	130,287	10.8
7	Michoacán	123,403	3.5
8	Guanajuato	101,449	-0.8
9	Baja California Sur	63,510	17.8
10	Durango	51,921	9.2
	Resto	299,819	-8.0

En cuanto al pimiento morrón exclusivamente, datos recientes de la SAGARPA (2017) menciona que la producción de chile morrón es de 104.4 mil toneladas con un mil 491 millones de pesos destacando en su generación los estados de Guanajuato, Jalisco, Querétaro, Durango y Coahuila, desplazando a Sinaloa como principal productor.



Figura 4. Datos estadísticos de la producción chiles en México. (SAGARPA-SIAP, 2017)

México, en 2016, exportó pimiento morrón a Estados Unidos y Canadá, principalmente. (SAGARPA, 2017)



Figura 5. Comercio exterior. (SAGARPA-SIAP, 2017)

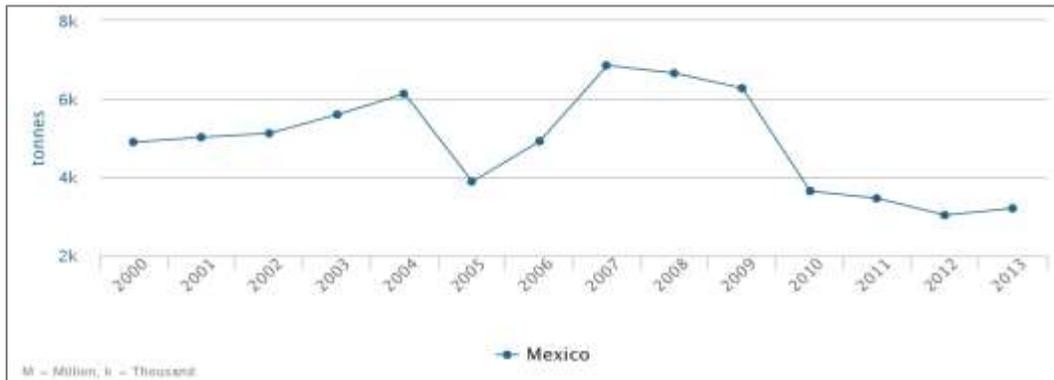


Figura 6. Producción de pimienta morrón en México de 2000 a 2013. (FAO, 2016)

En cuanto a la producción mundial, México no forma parte de los cinco primeros productores de pimienta morrón. Siendo Vietnam quien encabeza esta lista. (Figura 5)

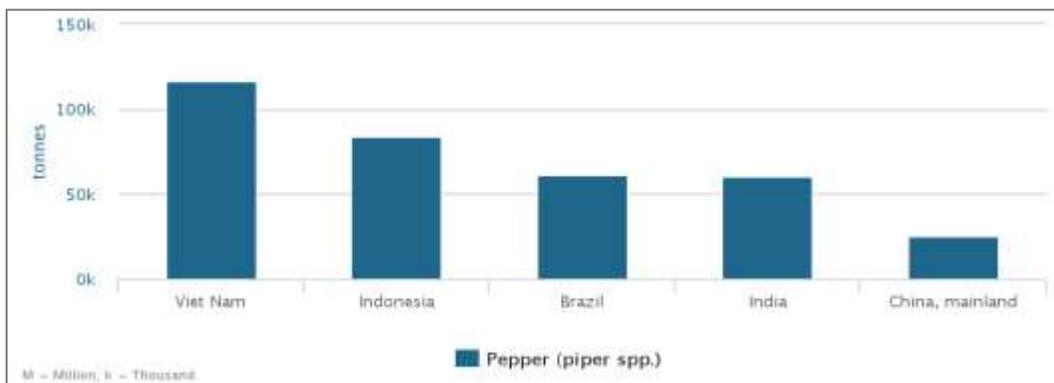


Figura 7. Principales productores de pimienta morrón en el mundo. (FAO, 2016)

1.3. Potasio

El potasio es un elemento muy abundante y es el séptimo entre todos los elementos de la corteza terrestre; el 2.59% de ella corresponde a potasio en forma combinada.

El potasio puede ser encontrado en frutas, hortalizas, cereales, carne y otros alimentos de origen animal.

Es el principal catión intracelular, los líquidos intracelulares contienen el 95% del potasio del cuerpo. Se trata de un electrolito fundamental para el cuerpo humano y requerimos el potasio para la realización de procesos biológicos indispensables como son: (Servín, 2013)

- Desarrollo muscular
- Mantener la presión osmótica
- Control de actividad eléctrica en el corazón
- Control de equilibrio ácido-base
- Interviene en la transmisión nerviosa
- Participa en la contracción muscular
- Activador enzimático
- Transporte de nutrimentos

Junto con el nitrógeno y el fósforo, el potasio es uno de los macronutrimentos esenciales para la supervivencia de las plantas. Su presencia es de gran importancia para la salud del suelo, el crecimiento de las plantas y la nutrición animal.

1.3.1. Ingesta Diaria Recomendable

El Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición "Salvador Zubirán" (INCMNSZ) señala las recomendaciones para la ingesta de potasio en las distintas edades. (Tabla 7)

Tabla 7. Recomendación de ingesta diaria de potasio (INCMNSZ, 2016)

Edad	Recomendación (mg/día)
0 a 6 meses	500
6 a 12 meses	700
1 a 3 años	1000
3 a 7 años	1400
7 a 10 años	1600
Mayores de 10 años y adultos	2000

1.3.2. Trastornos producidos por deficiencia de potasio

La hipopotasemia se define por una concentración sérica de potasio por debajo del límite inferior de la normalidad: $K^+ < 3.5$ meq/L. Es un trastorno electrolítico frecuente que puede ocurrir por 3 mecanismos: redistribución hacia el espacio intracelular, pérdidas extrarrenales (habitualmente digestivas), o pérdidas renales:

Causa	Mecanismo
Pseudohipopotasemia (leucocitosis extrema)	Captación celular de K
Bajo contenido en la dieta (raro)	Falta de ingesta
Alcalosis metabólica* Estimulación β_2 -adrenérgica: agonistas β_2 *, stress Insulina* Parálisis periódica hipopotasémica Proliferación celular en leucemias, linfoma de Burkitt y durante el tratamiento de la anemia megaloblástica Intoxicación por bario, tolueno, teofilina Tratamiento de la intoxicación digitálica con Digibind	Redistribución intracelular de K
<ul style="list-style-type: none"> • Digestivas (diarrea*, uso crónico de laxantes, fístulas, etc.) • Cutáneas (sudoración profusa, quemaduras extensas) 	Pérdidas extrarrenales de K
Con TA normal <ul style="list-style-type: none"> • Diuréticos* • Vómitos* o aspiración nasogástrica • Hipomagnesemia • Aniones no reabsorbibles (penicilina) • Trastornos tubulares (acidosis tubular renal, Síndrome de Bartter, Síndrome de Gitelman, cisplatino, levodopa, aminoglucósidos, anfotericina B, lisoziuria en leucemia) Con HTA e hiperactividad mineralocorticoidea <ul style="list-style-type: none"> • Renina baja: hiperaldosteronismo primario, regaliz, carbenoxolona, esteroides tópicos potentes, corticoides* • Renina alta o normal: estenosis arterial renal, • HTA maligna, síndrome de Cushing Con HTA y sin hiperactividad mineralocorticoidea <ul style="list-style-type: none"> • S. de Liddle Otros <ul style="list-style-type: none"> • Cetoacidosis diabética* • Poliuria posobstructiva 	Pérdidas renales de K
*Las más frecuentes Abreviaturas: HTA: hipertensión arterial; S: Síndrome	

Figura 8. Causas y mecanismos de la hipopotasemia (Sequera, 2016)

La gravedad de las manifestaciones clínicas de la hipopotasemia se correlaciona con los niveles de potasio sérico y con la velocidad de instauración de la misma:

<ul style="list-style-type: none"> • Cardíacas <ul style="list-style-type: none"> – Anomalías electrocardiográficas: aplanamiento e inversión de la onda T, onda U prominente, descensos del segmento ST, prolongación de los segmentos QT y PR, arritmias auriculares y ventriculares – Predisposición a la toxicidad digitálica • Neuromusculares <ul style="list-style-type: none"> – Debilidad, astenia, calambres, parestesias, parálisis respiratoria – Rabdomiólisis • Digestivas <ul style="list-style-type: none"> – Estreñimiento, ileo paralítico* • Renales <ul style="list-style-type: none"> – Disminución del filtrado glomerular y el flujo plasmático renal, nefritis intersticial – Diabetes insípida nefrogénica – Alcalosis metabólica – Aumento de la producción renal de amoníaco (NH₃) (predisposición a la encefalopatía hepática) – Aumento de la producción renal de prostaglandinas – Pérdida de cloro – Quistes renales (en la hipopotasemia crónica) • Endocrinas y metabólicas <ul style="list-style-type: none"> – Disminución de aldosterona – Aumento de renina – Descenso de insulina e intolerancia a los hidratos de carbono <p>*Es importante por ello vigilar las cifras de potasio en el posoperatorio de intervenciones digestivas</p>

Figura 9. Manifestaciones clínicas en la hipopotasemia (Sequera, 2016)

La urgencia del tratamiento depende de la severidad de la hipopotasemia y de la comorbilidad del paciente, y se basa en la administración de potasio. Debe realizarse un diagnóstico etiológico lo antes posible y corregir la causa. (Sequera, 2016)

1.3.3. Trastornos producidos por exceso de potasio

La hiperpotasemia se define por una concentración sérica de potasio por encima del límite superior de la normalidad: $K^+ > 5.5$ meq/L. Es la más grave de las alteraciones electrolíticas, porque puede provocar arritmias ventriculares fatales en minutos. (Sequera, 2016)

Lo anterior debido a un exceso de los depósitos de potasio corporal total o un movimiento anormal de salida de potasio de las células. Aunque en algunos casos se presenta la parálisis flácida, la hiperpotasemia suele ser asintomática hasta que sobreviene la toxicidad cardiaca:

- **Pseudohiperpotasemia**
 - Muestra hemolizada
 - Leucocitosis ($> 200.000/mm^3$) o trombocitosis intensa ($> 500.000/mm^3$)
 - Torniquete excesivamente apretado o contracción muscular de la extremidad
 - **Aporte excesivo de potasio oral o intravenoso (en presencia de insuficiencia renal)**
 - **Disminución de la eliminación renal**
 - Insuficiencia renal aguda o crónica
 - Enfermedad de Addison
 - Hiperplasia suprarrenal congénita
 - Hipoaldosteronismo hiporreninémico, acidosis tubular renal tipo IV
 - Fármacos que interfieren con la liberación y/o secreción de aldosterona: IECA, ARA II, inhibidores de la renina, heparina, ciclosporina, tacrolimus, sobredosis de digital
 - Fármacos que inhiben la secreción renal de potasio: diuréticos ahorradores de potasio (espironolactona, eplerrenona, triamtereno, amilorida), trimetoprima, pentamidina, L-arginina
 - Disfunción tubular distal (mieloma, amiloidosis, lupus, trasplante renal, drepanocitosis)
 - **Paso de potasio al líquido extracelular**
 - Acidosis
 - Lisis celular: traumatismos extensos, quemaduras, lisis tumoral, rabdomiólisis y hemólisis
 - Parálisis periódica hiperpotasémica
 - Déficit de insulina e hiperglucemia grave
 - Fármacos: bloqueadores β -adrenérgicos, intoxicación digitálica, succinilcolina, gonistas α -adrenérgicos, arginina, soluciones hipertónicas
-
- ARA II: antagonistas de los receptores de la angiotensina II; IECA: inhibidores de la enzima de conversión de la angiotensina

Figura 10. Causas de la hiperpotasemia (Sequera, 2016)

No es posible sufrir exceso de potasio a causa del aporte alimenticio de una persona sana, ya que el organismo tiene la capacidad de absorber estrictamente la cantidad necesaria de potasio y desechar lo que no necesita. El exceso de potasio se produce cuando existe alguna perturbación en el mecanismo de eliminación o la ingesta incorrecta de suplementos alimenticios.

1.3.4. Potasio 40

El potasio presente en la naturaleza está conformado por tres isótopos: ^{39}K , ^{40}K y ^{41}K , siendo el ^{39}K y ^{41}K estables y el ^{40}K radiactivo. (Tabla 8)

Tabla 8. Características de los isótopos de potasio

Número Atómico	Isótopo	Vida Media	Spin	Abundancia (a) (%)	Masa Atómica (uma)
19	^{39}K	Estable	3/2	93.20	38.96
19	^{40}K	1.29×10^9 años	4	0.0118	39.97
19	^{41}K	Estable	3/2	6.77	40.96

El potasio 40 es la principal fuente de radiación natural que proviene del cuerpo humano.

El 0.0118% del potasio elemental encontrado en los alimentos o en cualquier otra fuente se desintegra naturalmente debido a que su isótopo radiactivo busca un estado energético más estable. Dicha desintegración emite radiación gamma, en dosis que no son peligrosas, de forma natural y energía conocida.

El decaimiento radiactivo de ^{40}K es posible por dos diferentes vías y ambas pueden analizarse por métodos radiométricos:

- ❖ Decaimiento beta: A 1.33 MeV una partícula beta es emitida, al tiempo que el ^{40}K decae a ^{40}Ca . Esta vía tiene un 89% de ocurrencia.
- ❖ Captura electrónica: Esta vía tiene el 11% restante de ocurrencia. Seguido de la emisión de positrones hay emisión de radiación gamma a 1.46 MeV.

La actividad beta puede ser medida de manera eficiente con un contador Geiger-Müller, mientras que la actividad gamma, que es de interés para determinar el contenido de potasio para las muestras del presente trabajo, se mide con eficiencia mediante espectrometría gamma utilizando un detector de Germanio Hiperpuro (HPGe), que se caracteriza por ser el detector que mejor detecta las señales dadas por la radiación gamma, aunque esta sea de muy pocos MeV). (Brodsky, 1997)

La medición del contenido de potasio 40 y del contenido radiactivo en las muestras se estudiará a profundidad en los capítulos siguientes.

1.4. Legislación

Existen diversas organizaciones en el mundo dedicadas al control y manejo de sustancias radiactivas, así como para informar a la población de la importancia de estas en la salud de los seres humanos.

El trabajo de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) es ayudar a prevenir el cáncer y otras enfermedades, así como los efectos asociados con la exposición a la radiación ionizante y para protección del medio ambiente.

Desde 1928, la ICRP ha desarrollado, mantenido y desarrollado el Sistema Internacional de Protección Radiológica que se utiliza en todo el mundo como base común para las normas de protección radiológica, la legislación, directrices, programas y prácticas; basado en la comprensión actual de la ciencia de las exposiciones, los efectos de la radiación y los juicios de valor. Estos juicios de valor toman en cuenta las expectativas sociales, la ética y la experiencia adquirida en la aplicación del sistema. (ICRP, 2018)

El Comité Científico de las Naciones Unidas de la Radiación Atómica (UNSCEAR), fue establecido por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 1955. Su mandato en el sistema de las Naciones Unidas es evaluar y comunicar los contenidos y los efectos de la exposición a la radiación ionizante. Los gobiernos y las organizaciones de todo el mundo confían en las estimaciones de la Comisión como la base científica para la evaluación de riesgos de la radiación y para establecer las medidas de protección.

El programa de trabajo más reciente de UNSCEAR incluyó revisiones autorizadas de información sobre: los riesgos de la exposición al radón; estudios epidemiológicos de radiación y su cáncer y efectos no cancerígenos; efectos de la radiación en el sistema inmune; y respuestas celulares a la exposición a la radiación. También se realizan revisiones sobre exposiciones médicas, públicas y ocupacionales; exposiciones a la radiación de accidentes; efectos sobre la salud del accidente de Chernobyl; y efectos de la radiación en la biota no humana, publicado en el Informe 2008. (UNSCEAR, 2016)

La Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO), juega un rol importante en la determinación de las directrices en las normas de inocuidad alimentaria, en conjunto con la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Codex Alimentarius.

La FAO tiene la responsabilidad de asesorar a sus miembros acerca de una amplia gama de cuestiones relacionadas con la agricultura y la producción, elaboración, almacenamiento y

comercio de alimentos, incluido el cumplimiento de la legislación que rige la inocuidad de los alimentos.

El Codex Alimentarius tiene el objetivo de proteger la salud de los consumidores, garantizando prácticas comerciales equitativas en el comercio de alimentos, y la coordinación y promoción de todos los alimentos, normas acordadas por los organismos internacionales, gubernamentales y no gubernamentales.

La legislación internacional actual exige diversos parámetros rigurosos de seguridad radiológica para establecer límites reglamentarios de contaminantes en alimentos. Con ello se permite lograr un significativo margen de seguridad entre los niveles de contaminantes, basados en salud pública y su relación con el consumo de cada alimento, asegurando así la inocuidad de los suministros alimentarios y facilitar el comercio nacional e internacional de estos.

Junto con la FAO, la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), se centra en los sistemas y protocolos con los que se puede evaluar el grado de contaminación en la producción agrícola. El objetivo de estas actividades es mitigar los efectos de la contaminación radiactiva en la alimentación y la agricultura y fortalecer la seguridad radiológica del medio ambiente agrícola y de los consumidores. Esto a su vez respalda a los productores y el comercio, y por lo tanto tiene una dimensión tanto económica como social. (IAEA, 2017)

Los niveles establecidos de conformidad con los principios existentes de control de la contaminación de los alimentos, tales como niveles internacionales sugeridos por la FAO en caso de contaminación de los alimentos por radionúclidos, proporcionan la seguridad necesaria a los consumidores.

En México, la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) tiene como misión regular la seguridad nuclear, radiológica, física y las salvaguardias del uso de la energía nuclear para proteger la salud de la población y el ambiente, así como atender los compromisos internacionales en el uso pacífico de la energía nuclear. (CNSNS, 2018)

Para cumplir con los requisitos reguladores establecidos por la CNSNS, y debido a la operación de las instalaciones nucleares y radiactivas del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), éste cuenta con un Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental cuya finalidad es evaluar el impacto de las descargas al ambiente, detectar cambios en las tendencias a largo plazo de las concentraciones de actividad o de las tasas de dosis en el ambiente y, de ser el caso, llevar a cabo las acciones pertinentes.

Otro reglamento relacionado es el Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios, que entre los temas que maneja es el manejo de fuentes de radiación y sus residuos en el ambiente. En lo relativo a su

uso en alimentos el artículo 36 nos señala que: se permite la utilización de radiaciones en alimentos como método de esterilización, siempre y cuando no quede residuo alguno de radiación en el producto final. Al respecto la Secretaría promoverá la normatización de dicho proceso, con la intervención que corresponda a la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal.

En enero de 1995 fue publicada la Norma Oficial Mexicana NOM-088-SSA1-1994 (Bienes y Servicios. Contaminación por radionúclidos en alimentos de consumo masivo importados. Límites máximos permisibles.), que incluía una tabla indicativa de los límites permisibles de contaminantes radiológicos y su relación con su ingesta alimentaria. La información se centraba únicamente en Cs (134 y 137), Sr (90) y Sn (no especificado). Dicha norma fue cancelada en diciembre de 2004 considerando principalmente que:

- Debido al compromiso que tiene la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) de contribuir a la mejora regulatoria en nuestro país, ésta se ha enfocado a realizar acciones con el fin de eliminar proyectos o regulaciones excesivas para la industria que impongan costos innecesarios o que no representen un riesgo para la población;
- Aún y cuando no exista una Norma Oficial Mexicana que establezca los límites máximos permisibles de radionúclidos que deben cumplir los alimentos de consumo masivo importados, en caso de que se detecte que el producto podría generar un riesgo para la salud de la población, se podría prohibir su importación o su comercialización en territorio nacional;
- Los límites establecidos en dicha Norma Oficial Mexicana son más restrictivos que los establecidos en las normas internacionales sin que exista una justificación plena para ello;
- La norma que nos ocupa se encuentra dirigida exclusivamente a los productos de importación, lo cual atenta contra los principios de igualdad y trato nacional establecidos en los acuerdos y tratados internacionales firmados por nuestro país, los cuales señalan que las especificaciones de los productos deberán establecerse sin importar si su origen es nacional o importado.
- Debido a que la norma que nos ocupa no está orientada a una vigilancia continua de los productos y que los valores reconocidos internacionalmente son adecuados para aplicarlos en caso de conocimiento o sospecha de contaminación de alimentos con radionúclidos.

Por lo anterior, se siguen las recomendaciones dadas por la FAO incluidas en la Norma General del Codex para los Contaminantes y las Toxinas presentes en los Alimentos y Piensos (CODEX STAN 193-1995). Los radionúclidos son agrupados de acuerdo a sus niveles permisibles en Bq/kg (Becquerel por kilogramo).

Nombre del producto básico/producto	Nivel de referencia (NR) (Bq/kg)	Radionucleidos representativos	Parte del producto básico/producto al que se aplica el NR	Notas/observaciones
Alimentos para lactantes	1	Pu-238, Pu-239, Pu-240, Am-241		El NR se aplica a los alimentos para lactantes
Alimentos para lactantes	100	Sr-90, Ru-106, I-129, I-131, U-235		El NR se aplica a los alimentos para lactantes
Alimentos para lactantes	1 000	S-35 (*), Co-60, Sr-89, Ru-103, Cs-134, Cs-137, Ce-144, Ir-192		El NR se aplica a los alimentos para lactantes
Alimentos para lactantes	1 000	H-3(**), C-14, Tc-99		El NR se aplica a los alimentos para lactantes
Otros alimentos distintos de los alimentos para lactantes	10	Pu-238, Pu-239, Pu-240, Am-241		
Otros alimentos distintos de los alimentos para lactantes	100	Sr-90, Ru-106, I-129, I-131, U-235		
Otros alimentos distintos de los alimentos para lactantes	1 000	S-35 (*), Co-60, Sr-89, Ru-103, Cs-134, Cs-137, Ce-144, Ir-192		
Otros alimentos distintos de los alimentos para lactantes	10 000	H-3(**), C-14, Tc-99		

*) Representa el valor para el azufre orgánico

**) Representa el valor para el tritio orgánico

Figura 11. Niveles permisibles de radionúclidos, según el Codex Alimentarius

Los niveles de orientación se aplican a los radionúclidos contenidos en los alimentos destinados al consumo humano que son objeto de comercio internacional y se hayan visto contaminados como consecuencia de accidentes nucleares o emergencias radiológicas.

Para comprender los aspectos esenciales de radiación en alimentos, en este caso, en cultivos como el tomate verde y el pimiento morrón, es necesario conocer ciertos aspectos fundamentales de física de radiaciones. De esta manera se puede entender la importancia del análisis de contenido radiológico en los alimentos así como el fundamento de la técnica a emplear para este fin. Estos se podrán observar en los capítulos siguientes.

CAPÍTULO SEGUNDO: ASPECTOS FUNDAMENTALES DE FÍSICA DE RADIACIONES

2.1. Antecedentes generales

Desde el principio de la creación y de la formación de la tierra, han existido elementos radiactivos naturales que han interactuado con la materia y los organismos vivos.

Los núcleos atómicos de algunos isótopos tienen la característica de modificar su estructura al expulsar de dicho núcleo algunas partículas fundamentales, siendo identificados como radiactivos (radioisótopos).

Dentro de este ambiente se han desarrollado las células, sistemas complejos sometidos a los procesos de evolución, dando como resultado una diversidad de especies que han llegado a los seres humanos, y tal vez en un futuro a una nueva forma de vida pensante.

Radiación cósmica y sustancias radiactivas han estado siempre presentes en la tierra, en nuestros cuerpos, en el agua, suelo, aire y nuestro entorno.

Estas emisiones de radiación ionizante se les conocen popularmente como radiaciones ambientales. (Espinosa, 2013)

Existe una variación de las radiaciones ambientales, que conocemos como contaminación radiactiva, definida como la presencia no deseada de compuestos radiactivos en el medio ambiente.

Ciertos compuestos radiactivos forman parte de la corteza terrestre o se generan en nuestra atmósfera de manera natural al entrar en contacto con radiación cósmica. El problema radica en que, por acción humana, esta radiación natural se encuentra en concentraciones mucho más elevadas. (Young, 2009)

Al detectarse una elevada concentración de contaminantes radiológicos en el ambiente, los alimentos pueden, a su vez, contaminarse. En la mayoría de los casos, dicha contaminación proviene de accidentes nucleares, detonaciones nucleares a campo abierto, radioterapia, medicina nuclear y a las diversas industrias que generan importantes cantidades de residuos radiactivos. (Hefnawy, 2010)

2.2. Decaimiento radiactivo

Un núclido radiactivo es aquel que emite espontáneamente una partícula, transformándose a sí mismo en el proceso en un núclido diferente. Estos núcleos atómicos son inestables y buscan

una estabilidad energética a través de dicha transformación. Las emisiones más comunes son decaimiento α , β y γ . Cabe mencionar que este cambio es independiente de las condiciones ambientales o del estado de agregación en que se encuentre.

Independientemente de su naturaleza de desintegración, se trata de un fenómeno estadístico, por lo que podemos identificar a un núcleo radiactivo por su constante de decaimiento, que se define como la probabilidad de desintegración de un núclido en el tiempo:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Donde:

N=Número de núcleos radiactivos

N_0 =Número de núcleos radiactivos al tiempo 0

λ =Constante de decaimiento

t=Tiempo

Siguiendo la función dada podemos observar que, conforme avanza el tiempo, los núcleos radiactivos decrecen exponencialmente. (Espinosa, 2016)

2.2.1. Unidades

La unidad histórica de actividad es el *Curio* (Ci), que es definido como 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo. Pero a partir de 1975 se empezó a utilizar el *Becquerel* (Bq) como unidad internacional de actividad, siendo $1 \text{ Bq} = 2.703 \times 10^{-11} \text{ Ci}$. La unidad de medida de energía de las partículas radiactivas es el electrón Volt (eV) que se define como la energía que un electrón adquiere al pasar a través de una diferencia de potencial de exactamente un volt. Numéricamente, un eV equivale a $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$, o bien un J son $6.2 \times 10^{18} \text{ eV}$. (Lebo, 2001)

2.2.2. Vida media

Se conoce como vida media ($t_{1/2}$) al tiempo necesario para que la mitad de una muestra radiactiva se descomponga en sus productos. Estas son únicas para los diferentes núcleos radiactivos y pueden variar desde mucho menos de un segundo hasta millones de años. (ACS, 2005)

La ecuación para determinar la vida media de un radioisótopo es:

$$t_{1/2} = \frac{N_0}{2}$$

2.2.3 Núclido

De forma general un átomo con número atómico Z y número de neutrones N se denomina núclido. La suma de protones más neutrones del núcleo de un átomo es la masa A de un núclido.

Algunos átomos pueden tener ciertas similitudes entre los parámetros Z, N y A, aunque esto no quiere decir que se trate del mismo átomo. (Tabla 9)

Tabla 9. Tipos de núclidos

	Número atómico	Masa atómica	Neutrones	Ejemplos
Isótopo	Igual	Distinto	Distinto	$^{31}_{15}P$ y $^{32}_{15}P$
Isóbaro	Distinto	Igual	Distinto	$^{32}_{15}P$ y $^{32}_{16}P$
Isótono	Distinto	Distinto	Igual	2_1H y 3_2He
Isómero*	Igual	Igual	Igual	$^{19}_9F$ y $^{19m}_9F$

*Núclidos iguales en Z, A y N pero distinto nivel energético y se distinguen al agregar una "m" al número indicativo de la masa atómica.

El número de neutrones en un átomo determina si el núcleo es radiactivo. Generalmente, si un núcleo es estable, el número de N suele ser mayor que el número de protones.

2.2.3.1 Radioisótopos

Son isótopos radiactivos ya que tienen un núcleo atómico inestable (por el balance entre neutrones y protones) y emiten energía y partículas cuando cambia de esta forma a una estable.

Cada radioisótopo tiene un periodo de desintegración o tiempo de vida media característica. La energía puede ser liberada, principalmente, en forma de radiación alfa, beta o gamma. Estas tienen características particulares, algunas observables en la tabla 10.

Tabla 10. Tipos de decaimiento radiactivo y sus propiedades

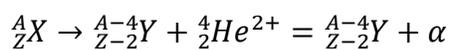
Decaimiento	Radiación			Efecto en el núcleo		Alcance	Poder de ionización
	Tipo	Carga	Masa	Carga	Masa		
Alfa	Partícula	+4	4 uma	-2	-4	Bajo (1.5 cm/aire)	Alto
Beta	Partícula	-1	Despreciable	+1	0	Medio (1.5 m/aire)	Medio
	Partícula	+1	Despreciable	-1	0	Medio (1.5 m/aire)	Medio
Gamma	Radiación	0	0	0	0	Muy alto	Bajo

Decaimiento alfa (α)

Es el proceso por el cual un núcleo atómico emite una partícula alfa, constituida por dos protones y dos neutrones, y se transforma en un núcleo con cuatro unidades de masa atómica menos y dos unidades menos de número atómico.

Se le puede considerar emisión espontánea de núcleos de ${}^4\text{He}$ (o partículas α) a partir de núcleos de átomos más pesados, mediante un proceso de fisión nuclear espontánea. Este tipo de desintegración es típico de los núcleos atómicos muy pesados.

Este proceso puede representarse como sigue:

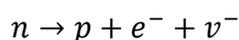


Debido a su carga y masa, las partículas alfa solo pueden recorrer algunos centímetros en el aire o algunos milímetros en sólidos antes de quedar en reposo.

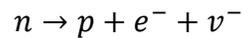
Decaimiento beta (β)

Es un proceso mediante el cual un nucleído inestable emite una partícula beta (un electrón o un positrón) para compensar la relación de neutrones y protones del núcleo atómico.

Desintegración β^-



Desintegración β^+



Los componentes ν (-,+), representan el neutrino y su antipartícula el antineutrino, que son las partículas neutras que son emitidas durante el proceso de desintegración del núcleo junto a su electrón o positrón.

La partícula beta puede ser un electrón, en una emisión beta menos (β^-), o un positrón, en una emisión beta más (β^+). La diferencia fundamental entre un electrón (β^-) y la de un positrón (β^+) con respecto a la partícula beta correspondiente es el origen nuclear de aquéllos: no se trata de un electrón ordinario expulsado de un orbital atómico.

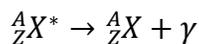
La emisión β^- implica la transformación de un neutrón en un protón y la emisión de una β^+ sucede cuando un protón se transforma en un neutrón.

Decaimiento gamma (γ)

Es un tipo de radiación electromagnética producida mediante transformación radiactiva o debido a procesos subatómicos con partículas de alta energía.

Cuando un electrón entra en un estado de excitación puede decaer a su estado basal con la consecuente emisión de fotones. El núcleo conserva su masa atómica y carga, cambiando únicamente su nivel energético. El núcleo en que se transforma puede ser de naturaleza radiactiva o no.

Se puede observar dicha transformación en la siguiente ecuación:



Como se observa en la tabla 8, esta radiación tiene un alcance muy alto debido a que presente longitudes de onda de alrededor de 10^{-12} nm de alta energía. Este tipo de decaimiento acompaña a sus homónimos alfa y beta.

2.3. Interacción de la radiación electromagnética con la materia

La radiación gamma, al no tener masa ni carga no puede ser frenada fácilmente por el medio que atraviesa. Por lo que existen mecanismos distintos al de las partículas alfa y beta que inducen a las radiación gamma a transformarse, emitiendo energía en forma de fotones.

Los mecanismos son: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares.

Efecto fotoeléctrico

Se define como la emisión de electrones provocada por la acción de la luz o de otras radiaciones electromagnéticas de corta longitud de onda. (Mataix, 1999)

Dicho de otra manera, es la interacción entre un fotón y un electrón fuertemente ligado, cuya energía de enlace es igual o menor que la energía del fotón, dando como resultado que el fotón desaparece dando lugar a una partícula ionizante llamada fotoelectrón, producida en una de las capas de electrones del material que la absorbe. (Figura 12) Una vez que sucede este fenómeno, el vacío en la capa electrónica es rápidamente llenado por un reordenamiento de electrones, esto provoca que la energía de enlace también libere energía. La energía liberada en forma de radiación electromagnética característica.

Este mecanismo de interacción es predominante cuando el tipo de energía es baja radiación gamma y dependiente del número atómico de quien absorbe. Es por esto que, para estos fines, el efecto fotoeléctrico es de suma importancia.

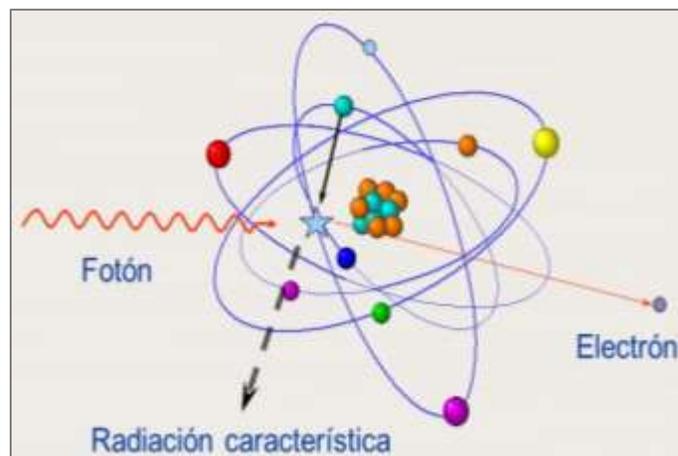


Figura 12. Efecto fotoeléctrico (IAEA)

Efecto Compton

Definido como la difusión de un fotón por interacción con un electrón libre o débilmente ligado, que entraña una pérdida de energía del fotón, la cual se comunica al electrón. (Mataix, 1999)

Esto sucede entre un fotón proveniente de radiación gamma y un electrón del material que lo absorbe. (Figura 13) El fotón incidente se dispersa para golpear al electrón del material absorbente, transfiriendo energía. (Duarte Alaniz, 2003)

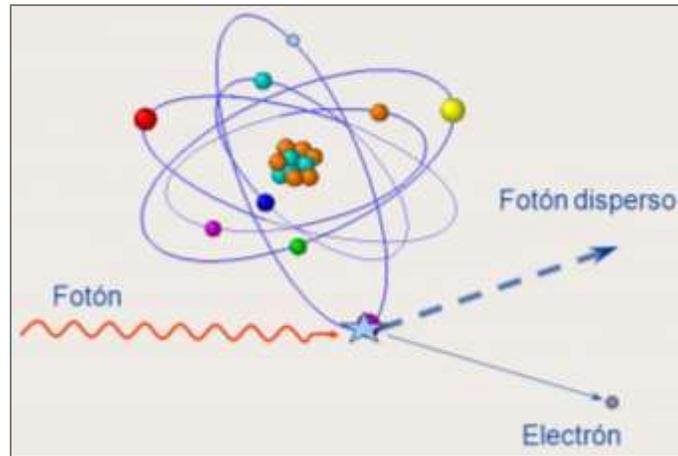


Figura 13. Efecto Compton (IAEA)

Producción de pares

Cuando un fotón tiene una energía cuántica más alta que la energía de la masa en reposo de un electrón más un positrón, una de las maneras en que tal fotón interactúa con la materia es mediante la producción de un par electrón-positrón.

La energía de masa en reposo del electrón es 0.511 MeV, así que por encima de 1.022MeV de energía fotónica, es posible la producción de pares. (Figura 14) Para energías de fotón muy por encima de este umbral, la producción de pares se convierte en el modo dominante de la interacción de los rayos X y la radiación gamma con la materia.

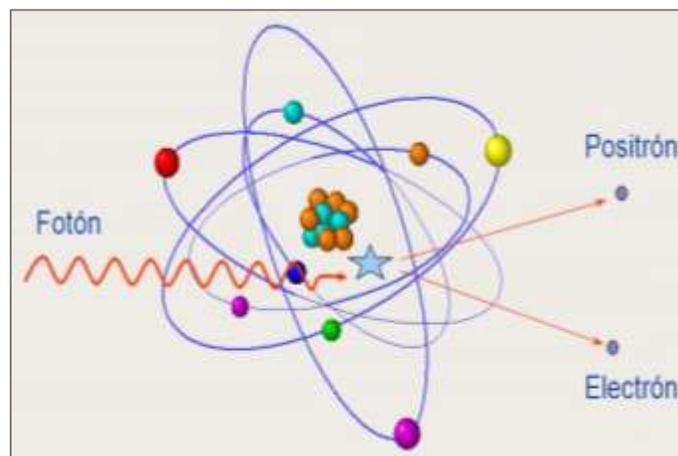


Figura 14. Producción de pares (IAEA)

2.4. Fuentes naturales y artificiales de radiación ionizante

Fuentes de radiación natural

La radiación natural existe desde el origen de la Tierra, y ha convivido con los seres vivos que habitan en ella y estos no solo no murieron sino que han evolucionado a través del tiempo. Esto es evidencia de que las radiaciones ambientales no solo no han sido nocivas, sino que se ha mencionado que las radiaciones son esenciales para la evolución de las especies de la Tierra, y son:

- Radiación cósmica (de alta energía)
- Radiación que emana de la tierra (3 cadenas naturales: ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th)
- Radón (proveniente de cadenas de decaimiento del uranio)
- Potasio 40
- Radiación proveniente de los seres humanos (^{14}C , ^{32}Na , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K)

Fuentes de radiación artificial

Por otro lado está la radiación artificial, que son aquellas generadas por el hombre y que son utilizadas en diversas áreas como la medicina, pruebas nucleares, producción de energía, etcétera.

Se debe tener un manejo adecuado de estas sustancias y sus residuos debido al impacto que pueden tener para el medio ambiente, ya que cualquier material no certificado en el que se encuentren dichos radioisótopos se considera contaminado, y dependiendo del contenido presente puede causar daños severos tanto al personal que lo maneja como al entorno que lo rodea.

2.5. Cadenas de decaimiento radiactivo de radiación natural

Como ya se ha mencionado, algunos elementos químicos cambian espontáneamente a otros por transmisión natural. Además de estas transmutaciones naturales, las partículas emitidas por estos elementos pueden causar la transmutación de los núcleos de otros elementos en sus cercanías.

Además, por el bombardeo de átomos estables de casi cualquier elemento con partículas de alta energía, se pueden producir nuevos elementos radiactivos, cada uno de ellos con un árbol genealógico de nucleídos radiactivos que finalizan en algún átomo estable. (Cánovas, 2006)

Cadena de decaimiento natural de ^{235}U

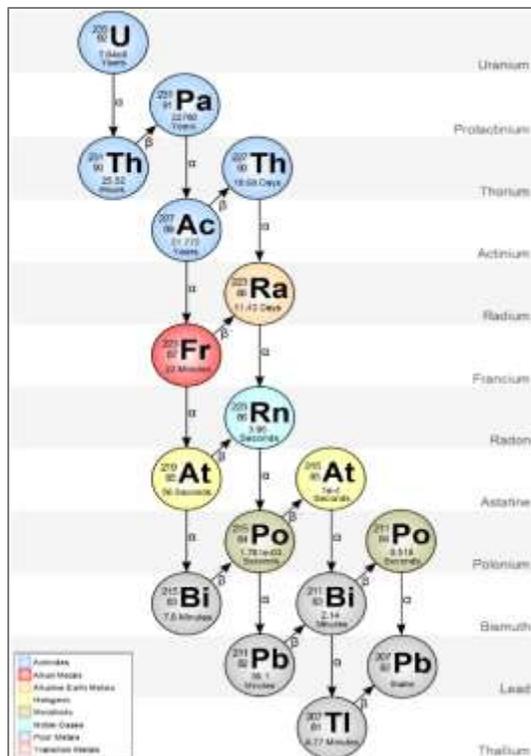


Figura 16. Cadena de decaimiento natural de ^{235}U . (<http://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/images/U235.png>)

Cadena de decaimiento natural de ^{232}Th

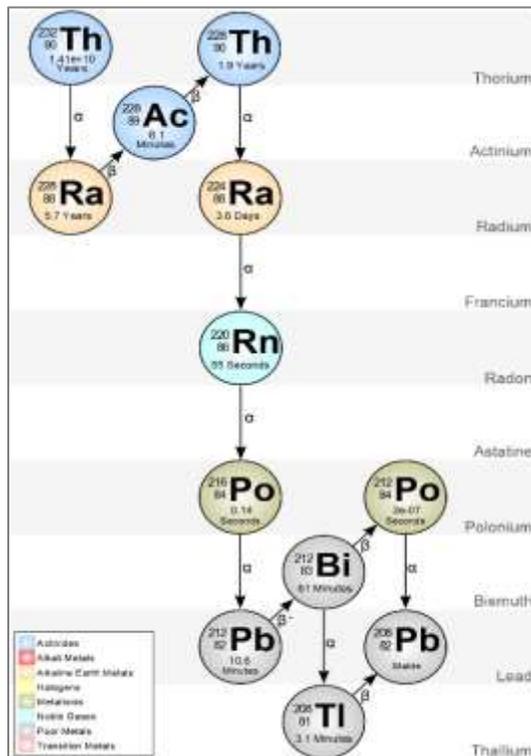


Figura 17. Cadena de decaimiento natural de ^{232}Th . (<http://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/images/Th232.png>)

2.6. Contaminación de alimentos por elementos radiactivos

El material radiactivo, tanto el producido por el ser humano como el natural, pasan a través de la cadena alimentaria de la misma manera y llegan a los cultivos, al agua potable o al mar. En los alimentos la principal entrada de material radiactivo es mediante el contacto con el suelo y las aguas de riego, siendo absorbidos a través de sus raíces.

En la naturaleza existen radionúclidos de vida media corta (horas, días, pocos meses) y de vida media larga (años, miles de años), algunos de los cuales representan un riesgo para la salud, por lo que deben tratarse de forma eficiente.

Los radioisótopos no naturales, producto de la actividad del hombre, que provienen de accidentes y explosiones nucleares, y los de importancia para el presente trabajo son: ^{239}Pu , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I y ^{90}Sr . Esto debido a que pueden penetrar en tejidos blandos y pasar a formar parte del metabolismo activo, como es el caso de ^{137}Cs , debido a que su similitud química con el potasio lo lleva a ser absorbido por el torrente sanguíneo y pudiendo ser distribuido a todas las células del cuerpo. (Riveroll, 1998)

Los radioisótopos naturales encontrados frecuentemente son producto del decaimiento de ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th . Es importante mencionar que el riesgo para la salud de los seres humanos dependerá de la concentración de estos en los alimentos, por lo que siempre se debe revisar el contenido de estos para así garantizar la seguridad alimentaria. Para el caso de cultivos, debido a que se encuentra en contacto directo con la tierra, estos pueden absorber en sus raíces y cuerpo elementos radiactivos contaminantes.

Un radioisótopo natural que merece una mención aparte es el ^{40}K , ya que, como se ha mencionado, el potasio es un mineral necesario para diversas funciones biológicas y una parte de este es obtenido a través de su forma radiactiva, siendo absorbido por el cuerpo humano, formando parte del metabolismo activo.

2.6.1. Efectos en la salud

Como se mencionó brevemente en el apartado anterior, el riesgo a la salud que representa una fuente radiactiva dependerá de su concentración. Tendrá que considerarse también la cantidad absorbida y la sensibilidad de determinados órganos y tejidos.

En el caso de los cultivos que no han estado expuestos a contaminación por accidentes nucleares, la dosis de radiación es bajo, por lo que a corto plazo el riesgo es menor y los posibles daños reparables. No obstante, siguen existiendo un riesgo de efectos a largo plazo, como el cáncer, que puede tardar años en manifestarse, aunque siempre considerando la relación probabilidad de aparición-dosis de radiación. (ONU, 2016)

2.7. Métodos de medición de contenido radiológico

En general, se tienen dos métodos para medir el contenido radiológico: El método químico, que consiste básicamente en la separación elemento por elemento, la cual es compleja, de bajo rendimiento y conlleva un gran tiempo de análisis; y el método nuclear (espectrometría gamma), el cual es simple, se pueden analizar todos los elementos radiactivos existentes en la muestra, en un tiempo corto y con una alta eficiencia. Es por ello que este último método fue elegido para llevar a cabo los análisis del presente trabajo.

2.7.1. Espectrometría gamma

La espectroscopia gamma consiste en la distribución de energías de los elementos radiactivos (radioisótopos), por medio del efecto fotoeléctrico producido por la radiación gamma en los materiales.

Para realizar espectrometría gamma se requiere de un detector de radiación, instrumentación electrónica y un analizador de altura de pulso multicanal (MCA)

2.7.1.1. Detector de Germanio Hiperpuro

Se trata de un detector semiconductor. Los detectores semiconductores basan su funcionamiento en la producción de pares (de cargas positivas y negativas) por la acción de la radiación emitida en los materiales sólidos cristalinos semiconductores, en este caso, fabricado de germanio.

En este tipo de cristales la diferencia entre la unión de los electrones de valencia y la energía de conducción, no es muy grande, por lo que la ausencia de un electrón de valencia en el nivel de unión origina vacancias positivas. Si se hace incidir una partícula cargada (radiación gamma), la partícula arrancará electrones de valencia con la suficiente energía para alcanzar la banda de conducción creando pares de electrones libres y vacancias positivas análogos a los pares de iones. (Duarte, 2003)

Estos electrones son recolectados colocando un electrodo positivo en una de las caras del cristal y, de esta forma, se obtiene un pulso eléctrico cuya altura es proporcional al número de electrones liberados por la partícula cargada.

Consiste en un cristal semiconductor de germanio de alta pureza sobre el que se aplica una diferencia de potencial elevada, a fin de establecer un intenso campo eléctrico. La radiación gamma procedente de la muestra interacciona con el detector mediante los procesos característicos de altas energías (ver 2.3). La energía depositada por el fotón se transforma en

portadores de carga, que bajo la acción de campo eléctrico generan un pulso de corriente proporcional a dicha energía. (Barrera, 2008)

En la tabla 12 se enlistan las principales ventajas y desventajas de este tipo de detector:

Tabla 12. Ventajas y desventajas del HPGe

Detector	Ventajas	Desventajas
Germanio Hiperpuro (HPGe)	<ul style="list-style-type: none">• Ofrece una excelente resolución de energía• Alta eficiencia de detección, utilizando la geometría adecuada• Tiempo de análisis corto y con un gran número de repeticiones (24 h, 1 cada segundo)	<ul style="list-style-type: none">• Uso de criostato siempre que se efectúe un análisis• Eficiencia de detección dependiente de la geometría• Se requiere personal altamente calificado

Los detalles del funcionamiento de este detector se observarán en el capítulo cuarto que ilustra la instrumentación utilizada para el presente trabajo.

CAPÍTULO TERCERO: METODOLOGÍA

Todo procedimiento experimental requiere de una metodología para la realización de análisis. Dicha metodología debe ser descrita de tal forma que pueda reproducirse en cualquier otro laboratorio siguiendo las mismas condiciones planteadas para el experimento.

En la figura 18 se muestra el diagrama de bloques de la metodología seguida en el procedimiento experimental.

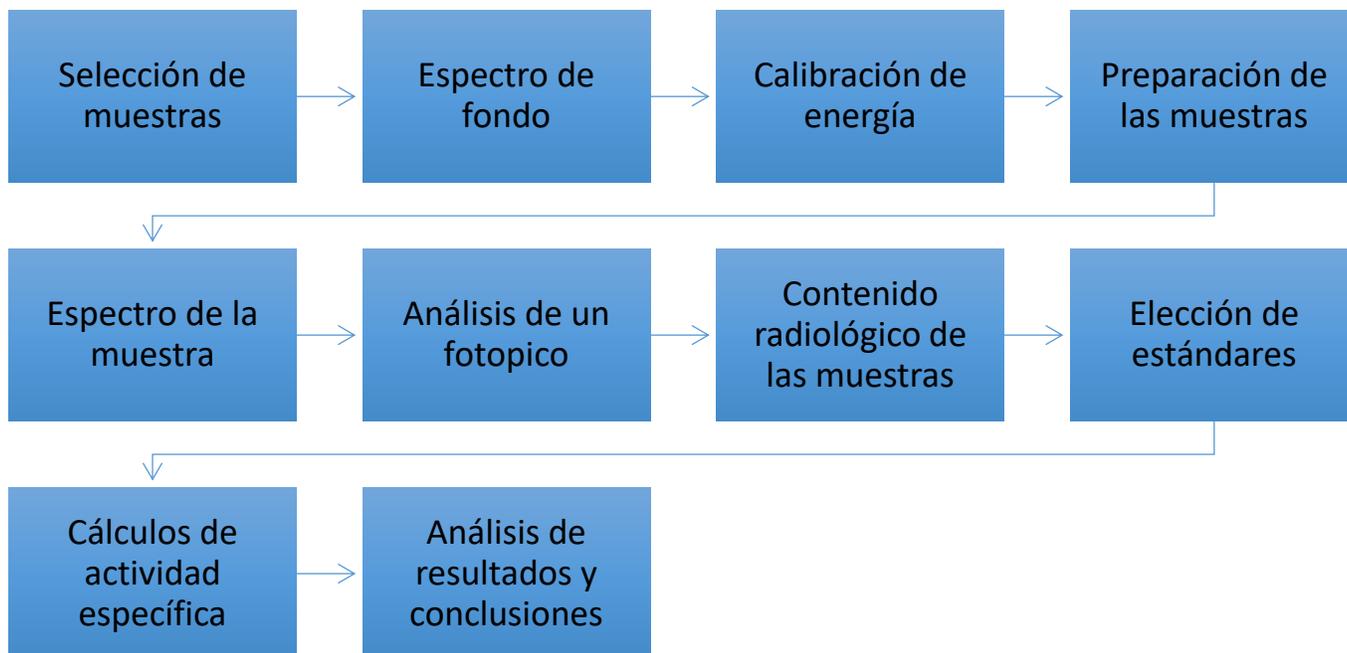


Figura 18. Diagrama de bloques del procedimiento experimental

3.1. Selección de muestras

Tomate verde: Es una hortaliza muy popular en cuanto a su uso y consumo en México, además que es exportada a otros países del continente, incluyendo Estado Unidos, y algunos países de Europa.

Pimiento morrón: México participa de forma activa en la producción de pimiento en el mundo, siendo Canadá su principal comprador. Además de ser un alimento cultivado y altamente consumido en el centro y sur de América desde hace más de 5000 años.

Al revisarse la información anterior acerca del tomate verde y el pimiento morrón, se tomó en cuenta para la selección de las muestras la facilidad de obtención al seguir la cadena de distribución señalada por el Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (SNIIM).

La tabla 13 muestra los estados muestreados. El muestreo fue realizado en mercados y tiendas de autoservicio según lo indicado al día por la SNIIM. Las muestras obtenidas no cuentan con información específica de procedencia ni las condiciones de cultivo.

Las muestras fueron refrigeradas hasta su preparación para el análisis para evitar la descomposición de la hortaliza. Las cantidades recolectadas fueron de 1 kg para el tomate verde, utilizando únicamente 500 g para el análisis, 600 g para el pimiento morrón, utilizando 350 g (Guanajuato) y 300 g (Sinaloa).

Las cantidades se eligieron así debido al volumen y distribución en el contenedor Marinelli®.

Tabla 13. Datos de las muestras seleccionadas y analizadas

Muestra	Clave	Lugar de origen	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Cantidad de muestreo (g)	Muestra analizada (g)
Tomate verde						
1	TVZ	Zacatecas	Central de Abastos Iztapalapa	Septiembre 2016	1000	500
2	TVS	Sinaloa	Wal Mart Miramontes			
3	TVN	Nayarit	Gustavo A. Madero			
4	TNP	Puebla	Coacalco			
Pimiento morrón						
Verde	PMVG	Guanajuato	Bodega Aurrera Miramontes	Octubre 2016	600	350
Amarillo	PMAmG	Guanajuato				
Anaranjado	PMAng	Guanajuato				
Rojo	PMRG	Guanajuato				
Verde	PMVS	Sinaloa	Wal Mart Miramontes	Noviembre 2016	300	300
Amarillo	PMAmS	Sinaloa				
Anaranjado	PMAngS	Sinaloa				
Rojo	PMRS	Sinaloa				

3.2. Espectro de fondo

El espectro de fondo está constituido por radiación cósmica, radón ambiental y potasio cuarenta como se puede observar en la figura 19.

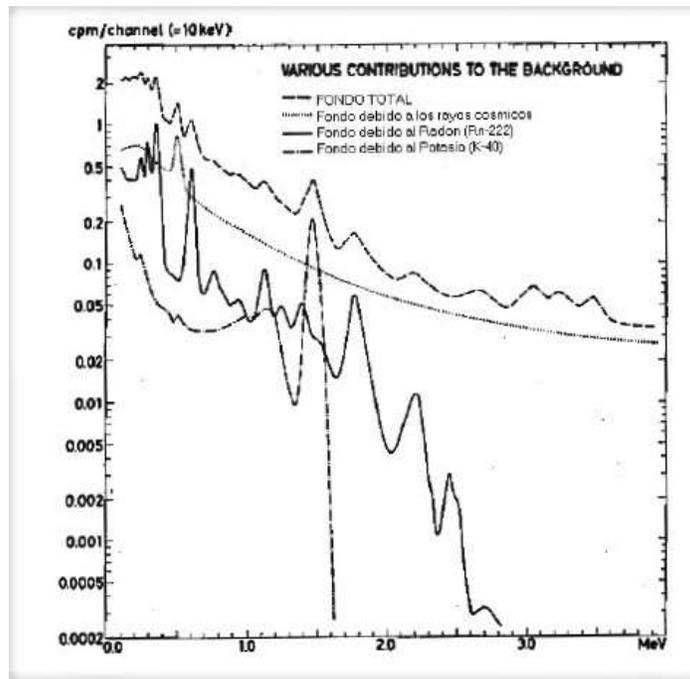


Figura 19. Composición del espectro de fondo

Estos parámetros dependen del lugar y medio ambiente en donde se realiza la medición.

Con base en el espectro de fondo (Figura 20) se compararán los espectros obtenidos de cada una de las muestras.

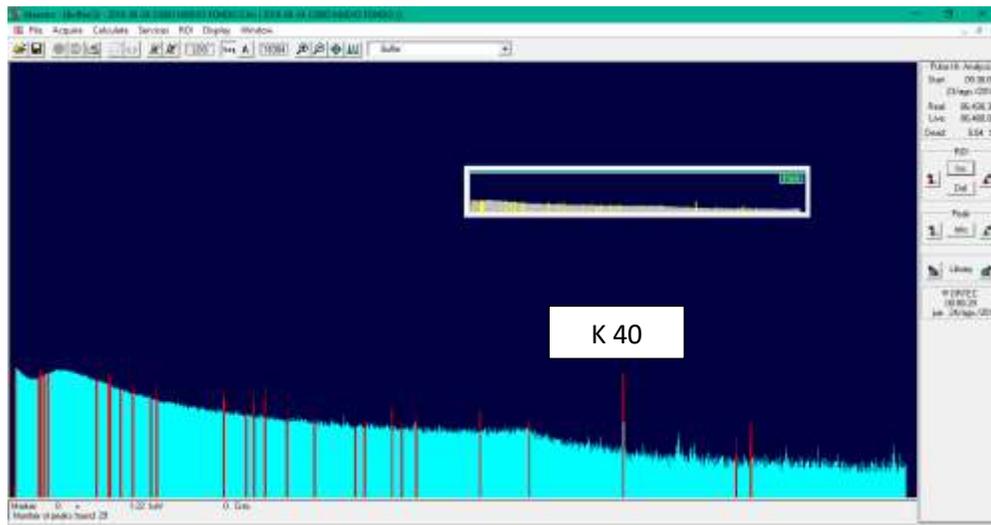


Figura 20. Fotopicos obtenidos para un espectro de fondo

La obtención de este espectro es fundamental para el análisis, obteniendo las diferencias entre uno y otro. En la figura se muestra el espectro de fondo utilizado.

3.3. Calibración de energía

El diseño de los elementos del sistema de espectrometría gamma permite establecer la proporcionalidad entre la energía depositada por la radiación en el detector y el correspondiente canal asociado en el espectro, es decir, conocer la relación entre un fotopico y su energía asociada.

Para llevar a cabo la calibración del equipo es necesario colocar fuentes de radiación gamma conocidas dentro del contenedor Marinelli® y dejar que el detector colecte la información.

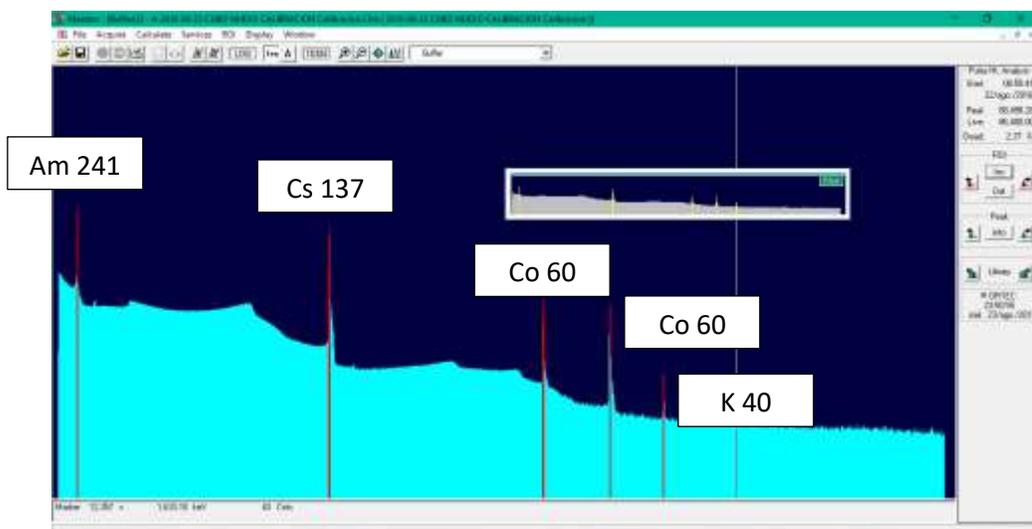


Figura 21. Fotopicos obtenidos para un espectro de calibración

Tabla 14. Fuentes de radiación utilizadas

Radioisótopo	Energía (keV)	# Canal	Área neta
²⁴¹ Am	60	445	18515373±5014
¹³⁷ Cs	662	5003	11604017±4409
⁶⁰ Co	1173	8873	246484±836
⁶⁰ Co	1332	10079	192694±793
⁴⁰ K	1460	11050	4433±137

Toda calibración debe realizarse con al menos tres fuentes de radiación gamma conocidas y que preferentemente abarquen un rango de energía amplio, es decir que exista una separación considerable entre cada radionúclido. (Padilla, 2013)

3.4. Preparación de la muestra

Para este tipo de análisis la preparación de las muestras es simple. Se debe considerar como principal parámetro la normalización del peso de las muestras. Los pesos normalizados fueron de 500 g (tomate verde), 350 g (pimiento morrón de Guanajuato) y 300 g (pimiento morrón de Sinaloa).

Cada fotopico corresponde a la energía de los fotones que llegan al detector y el número de cuentas en el fotopico es proporcional a la cantidad de fotones incidentes.

Este software permite situarse en el sitio energético del fotopico de interés (Figura 23), seleccionando la región de interés (ROI, por sus siglas en inglés). La región seleccionada cambia de color a la selección y es equivalente al área bajo la curva. (Padilla, 2013)

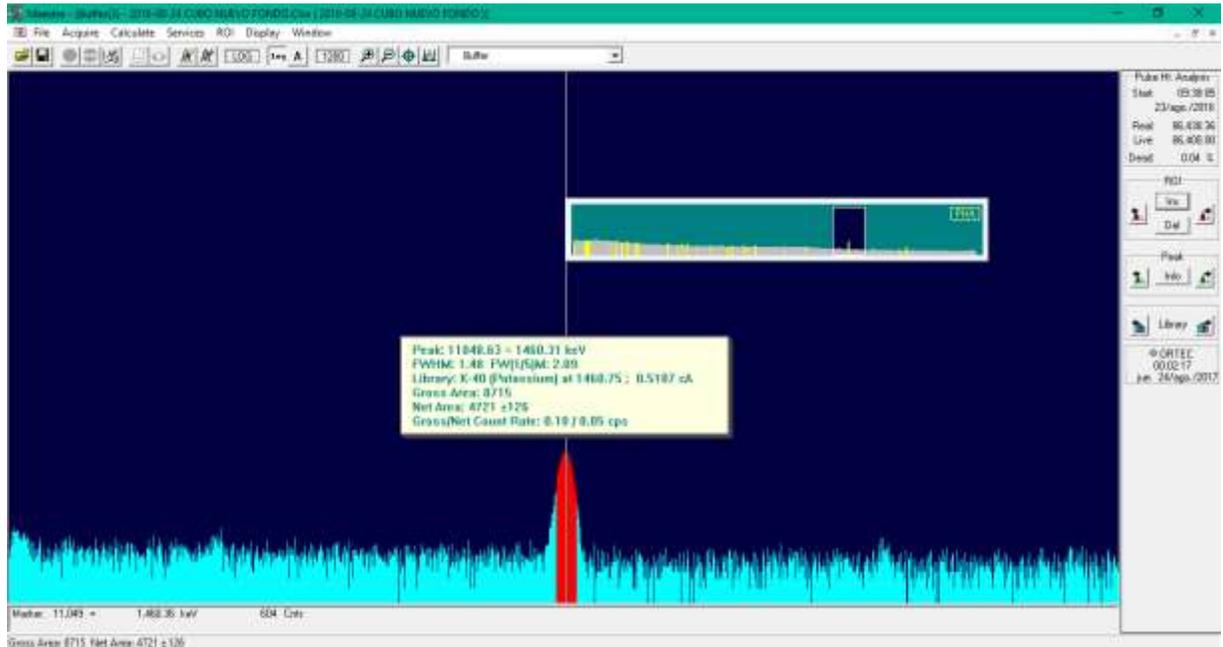


Figura 23. Selección del fotopico correspondiente al isótopo ^{40}K

La información que se obtiene del fotopico seleccionado es:

- ✓ Energía del fotopico
- ✓ Centroide
- ✓ Integral del área bajo la curva (del área gruesa)
- ✓ Integral del área bajo la curva (del área neta)
- ✓ Energía del radioisótopo y búsqueda del elemento

La información esencial para la realización de cálculos es el valor del área neta, que se calcula de acuerdo al modelo matemático de la figura 24.

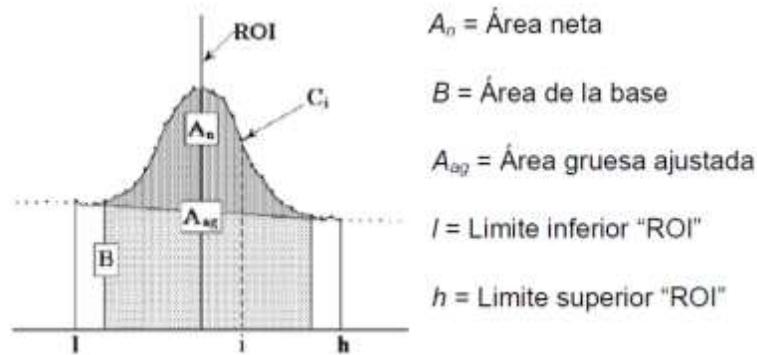


Figura 24. Representación de las partes de un fotopico

La base (B), que es el área de la base, está dada por la ecuación:

$$\left(\sum_{i=l}^{l+2} C_i + \sum_{i=h-2}^h C_i \right) \frac{h-l+1}{6}$$

El área gruesa (A_g) es la suma de todos los canales marcados por ROI desde el límite inferior (l) hasta el límite superior (h). Su ecuación:

$$A_g = \sum_{i=l}^h C_i$$

Las cuentas del canal están representadas por C_i y los canales utilizados son 6 (tres en cada extremo).

El área gruesa ajustada (A_{ag}) es la suma de todos los canales marcados por ROI pero no usados en la base (B).

El área neta (A_n) es el área gruesa ajustada menos la base calculada:

$$A_n = A_{ag} \frac{B(h-l-1)}{(h-l+1)}$$

l y h son los límites inferior (low) y superior (high) respectivamente.

La incertidumbre en el área neta es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la incertidumbre en el área gruesa ajustada y el error que existe en el ajuste de la base. (Florián, 2016)

Esta está dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{Af} = \sqrt{A_{ag} + B \left(\frac{h-l-5}{6} \right) \left(\frac{h-l-5}{h-l+1} \right)}$$

Donde:

σ_{Af} = desviación estándar para el área del fotopico

El software integra automáticamente los datos anteriores (Figura 25) y nos permite conocer la información específica para cada fotopico de interés.

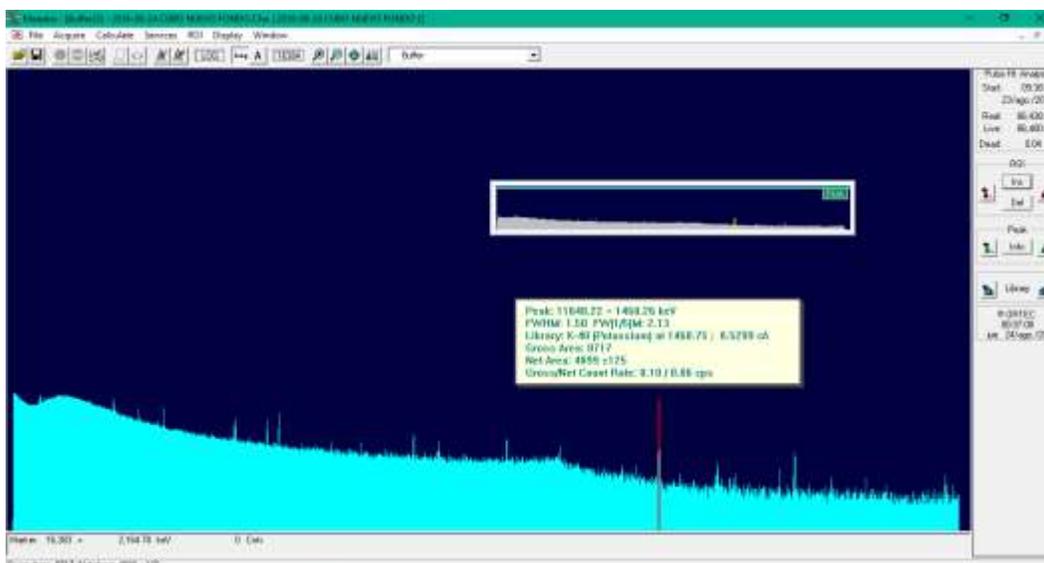


Figura 25. Selección de un fotopico y su información de interés

3.7. Contenido radiológico en las muestras

Los espectros obtenidos para las muestras pueden contener diversos tipos de radioisótopos de tipo artificial y natural. En las tablas 15 y 16 se muestran los radionúclidos de interés para el presente estudio:

Tabla 15. Contenido radiológico artificial

Radioisótopo artificial	Vida media	Isótopo estable
I 131	8.02 días	Xe 131
Cs 134	2.07 años	Ba 134
Cs 137	30.19 años	Ba 137
Pu 234	8.89 horas	Pb 206

Tabla 16. Contenido radiológico natural

Cadena de decaimiento	Radioisótopos
U 238	U 238, Th 234, Pa 234, U 234, Th 230, Ra 226, Rn 222, Po 218, At 218, Pb 214, Bi 214, Po 214, Tl 210, Pb 210, Bi 210, Po 210, Hg 206, Tl 206, Pb 206 (Estable)
U 235	U 235, Th 231, Pa 231, Ac 227, 227 Th, Fr 223, Ra 223, At 219, Rn 223, Bi 215, Po 215, At 215, Pb 211, Bi 211, Po 211, Tl 207, Pb 207 (Estable)
Th 232	Th 232, Ra 228, Ac 228, Th 228, Ra 224, Rn 220, Po 216, Pb 212, Bi 212, Po 212, Tl 208, Pb 206 (Estable)
K 40	K 40, Ca 40 (Estable), Ar 40 (Estable)

Los isótopos estables no se encontrarán en los espectros, debido a que no emiten energía de radiación gamma, pero son referidos debido a que son el final de la cadena de decaimiento.

Una vez registrando el valor del área neta del fotopico a estudiar se debe hacer una comparación entre los espectros de fondo y muestra. De esta forma podemos conocer los fotopicos que se encuentran realmente en la muestra y, de ser de interés, calcular su contenido.

Para ello se resta el área neta de la muestra (Figura 26) menos el área neta del fondo (Figura 27), conocida como el área neta ajustada y recalculando la incertidumbre con la fórmula dada anteriormente.

Gross Area: 9446
 Net Area: 8091 ±144
 Gross/Net Count Rate: 0.11 / 0.09 cps

Figura 26. Área neta del fotopico correspondiente a ⁴⁰K en tomate verde de Zacatecas

Gross Area: 8715
 Net Area: 4721 ±126
 Gross/Net Count Rate: 0.10 / 0.05 cps

Figura 27. Área neta del fotopico correspondiente a ⁴⁰K en el fondo

Obteniendo como resultado (Tabla):

Tabla 17. Área neta de potasio 40 en la muestra de tomate verde de Zacatecas

Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta TVZ	Área neta fondo	Área neta ajustada
K 40	1460.0	8091±144	4721±126	3370±191

La incertidumbre resultante nos muestra la presencia de un radioisótopo en la muestra, siendo:

- Un valor mayor al obtenido de área neta ajustada (ANA) se considera dentro de incertidumbre
- Un valor negativo de ANA significa que el radioisótopo correspondiente está ausente en la muestra
- Un valor positivo menor al obtenido de ANA nos indica la presencia de un radioisótopo de forma significativa por lo que se procedería a realizar cálculos de actividad específica para conocer el contenido real del radionúclido en la muestra.

La instrumentación utilizada para llevar a cabo esta metodología se menciona en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO CUARTO: INSTRUMENTACIÓN

El análisis de la metodología nuclear requiere de una instrumentación específica, compuesta por un detector de radiación (HPGe), el cual transforma la radiación ionizante en corriente eléctrica, esta a su vez se convierte en pulsos de voltaje, los cuales son analizados con base a su altura, por un analizador multicanal (16000 canales), y son ordenados de menor a mayor (número de canal), los cuales se relacionan a la energía de emisión del isótopo radiactivo mediante la calibración del equipo. En la figura 28 se describe el diagrama de la instrumentación usada:

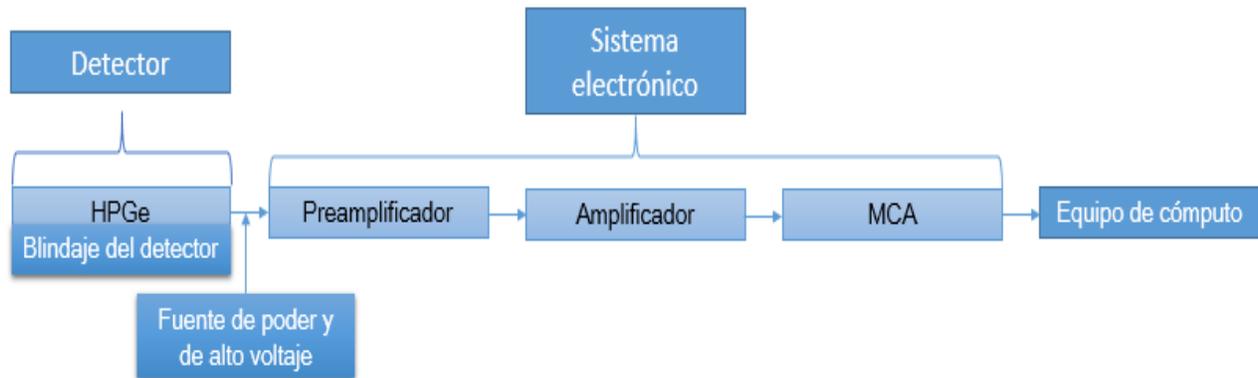


Figura 28. Diagrama del sistema de análisis utilizado

En la figura 29 se muestra una fotografía del sistema real de detección que se utilizó para la elaboración del presente trabajo:



Figura 29. Fotografía del sistema utilizado (PAD-IFUNAM)

4.1. Detector semiconductor de Germanio Hiperpuro (HPGe)

El detector de HPGe (Figura 30), como se mencionó, es el que presenta las mejores características para el análisis, siendo el recomendado por la FAO. En este caso se tiene una resolución de 3.1 keV por canal.

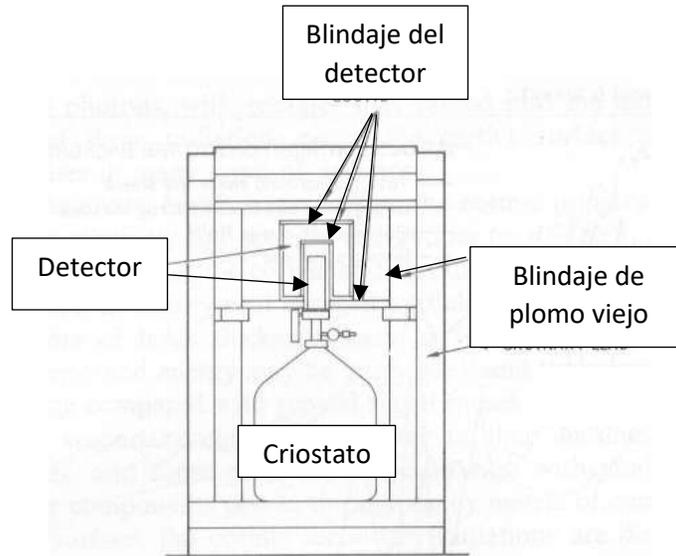


Figura 30. Esquema del detector HPGe y su blindaje

En la figura 31 se puede observar al detector, que consiste en un cristal semiconductor de germanio hiperpuro, dentro del blindaje de plomo viejo y, el criostato en donde se pone el nitrógeno líquido (-195.8 °C), para mantener frío el detector durante la operación



Figura 31. Detector dentro de blindaje y criostato (PAD-IFUNAM)

4.1.1. Blindaje del detector

El sistema de detección empleado, se le denomina como de bajo nivel de fondo, pues tiene una coraza de 30 cm de plomo viejo (para evitar la contribución del plomo en el fondo) por cada lado y 2 cm en la tapa, para disminuir la radiación ambiental y de las fuentes radiactivas cercanas. En la figura 32 podemos ver el blindaje del detector.



Figura 32. Blindaje del detector (PAD-IFUNAM)

En el interior del blindaje se tienen materiales que absorben la radiación para evitar en lo posible la retrodispersión, elaborados de cobre, aluminio y lucita (polimetil metacrilato).

4.1.2. Contenedor de la muestra

Para conservar la geometría de detección se utiliza un dispositivo de polipropileno denominado Marinelli® (Figura 33), en donde se coloca la muestra, obteniendo la mejor distribución del material, mismo peso de análisis y misma geometría de detección en todas las mediciones.



Figura 33. Contenedor Marinelli®

4.2. Sistema electrónico

La instrumentación electrónica consiste en una fuente de alto voltaje que alimenta al detector, un preamplificador que se encuentra dentro de la cápsula de aluminio del detector, amplificador, analizador multicanal y sistema de cómputo, en donde se instaló el programa MAESTRO-32 v6 ORTEC®.



De izquierda a derecha podemos observar: fuente de alto voltaje, amplificador, MCA
Figura 34. Componentes del sistema electrónico (PAD-IFUNAM)

Fuente de alto voltaje: Para alimentar al detector se requieren +2800 V, con regulación de $\pm 0.1\%$

Preamplificador: Su función básica es la de acoplar las impedancias entre el detector y el amplificador, para obtener la máxima transferencia de información.

Amplificador: La función del amplificador es la de aumentar el tamaño de la señal que proviene del preamplificador, para su mejor análisis.

Analizador Multicanal (MCA): La función del MCA es la de ordenar y contar los pulsos de señal que recibe del amplificador. Este ordenamiento es con base en la altura de cada uno de los pulsos que corresponden a cada energía de los elementos radiactivos que están presentes en la muestra analizada, definiendo así su presencia y contenido, haciendo el análisis de altura de pulsos, segmentando cada pulso en 16000 partes (o canales). El MCA utilizado en esta tesis es el recomendado por la FAO.

4.3. Equipo de cómputo

La información y datos obtenidos se despliega y guarda en la memoria de la computadora con el programa MAESTRO-32 v6 ORTEC®, obteniendo el espectro de energías de la muestra, como se puede observar en la figura 35.

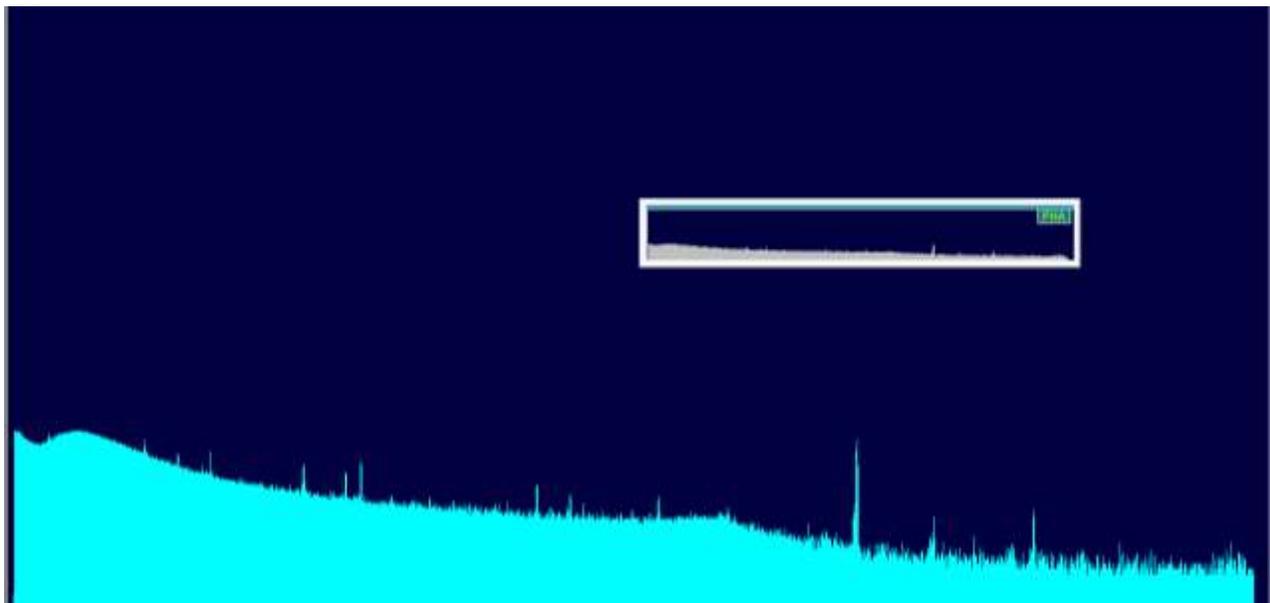


Figura 35. Espectro obtenido para una muestra de tomate verde del estado de Zacatecas

El análisis de cada uno de los fotopicos es automático, obtenido mediante la computadora. El área neta se obtiene restando al valor de la integral bajo la curva denominado "grueso" el valor neto de ésta, y así, con esta información, hacer los cálculos pertinentes para la obtención de resultados para cada una de las muestra de hortalizas seleccionadas, como se menciona en el capítulo 5 de este trabajo.

Toda la parte experimental se realizó aprovechando las facilidades e instalaciones del laboratorio 25 del Proyecto de Aplicaciones de Dosimetría en el edificio Van de Graff, dentro del Instituto de Física de la UNAM.

CAPÍTULO QUINTO: RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para cada una de las muestras, analizadas bajo las mismas condiciones utilizando un detector de HPGe.

5.1. Espectro de fondo

En el gráfico 1 se muestra el espectro de fondo utilizado para el análisis, dicho espectro muestra los fotopicos encontrados identificados con un número. En la tabla 16 se muestran los resultados correspondientes: número de fotopico, radioisótopo, energía asociada y área neta calculada.

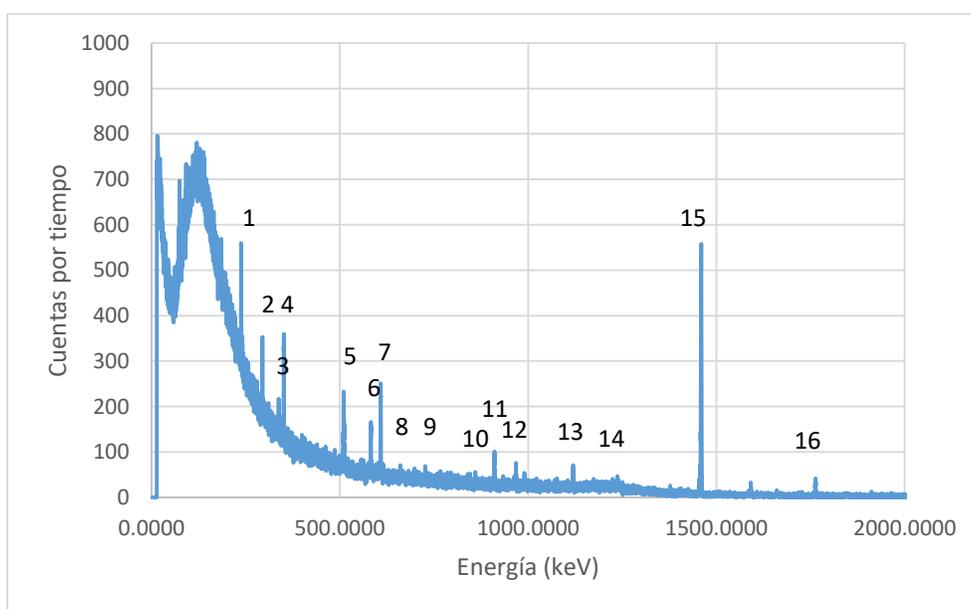


Gráfico 1. Espectro de fondo.

Tabla 18. Radioisótopos encontrados en el espectro de fondo

Número de fotopico	Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta
1	Pb 212	238.6	1929±148
2	Pb 214	295.2	1233±115
3	Ac 228	338.5	562±99
4	Pb 214	352.0	2007±103
5	Tl 208	510.7	898±100
6	Tl 208	583.2	1047±71
7	Bi 214	609.3	2138±76
8	Bi 214	665.6	157±56
9	Bi 212	727.2	272±54
10	Ac 228	841.0	117±46

Número de fotopico	Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta
11	Ac 228	911.0	593±58
12	Ac 228	969.0	392±50
13	Bi 214	1120.4	462±51
14	Bi 214	1238.2	172±44
15	K 40	1460.0	4721±126
16	Bi 214	1764.0	302±36

5.2. Calibración de energía

El detector de HPGe fue calibrado con ayuda del software MAESTRO-32, utilizando fuentes de radiación conocidas, mencionadas con anterioridad. La tabla 5 nos indica los parámetros obtenidos para dichas fuentes.

Tabla 19. Fuentes de radiación utilizadas para la calibración del espectro de radiación gamma

Radioisótopo	Energía (keV)	# Canal	Área neta
²⁴¹ Am	60	445	18515373±5014
¹³⁷ Cs	662	5003	11604017±4409
⁶⁰ Co	1173	8873	246484±836
⁶⁰ Co	1332	10079	192694±793
⁴⁰ K	1460	11050	4433±137

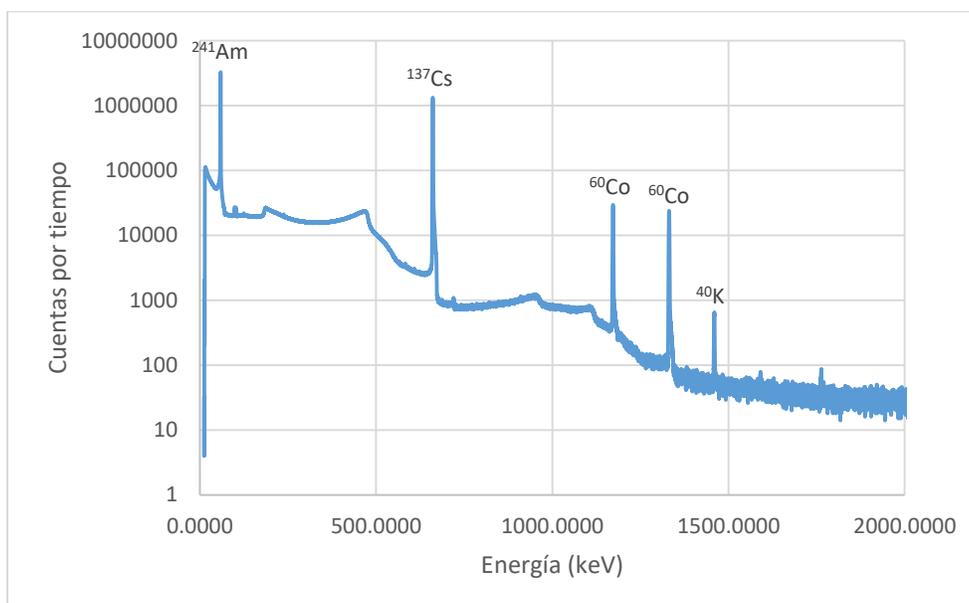


Gráfico 2. Espectro de calibración

El tiempo de análisis fue de 86400 s, al igual que todos los análisis realizados en el presente trabajo, la tabla 17 y el gráfico 2 muestran los fotopicos representantes de las energías emitidas por las fuentes de radiación conocidas.

El ^{214}Am decae por emisión de una partícula α hacia ^{237}Np ; el ^{137}Cs decae mediante decaimiento β en ^{137}Ba ; el ^{60}Co decae por emisión β hacia un estado excitado de ^{60}Ni que pasa a otro estado excitado, emitiendo dos cuantos de energía hacia un estado estable de ^{60}Ni , por lo que emite dos energías observables; el ^{40}K sufre un decaimiento β , decayendo a ^{40}Ar estable.

La calibración debe hacerse con al menos tres fuentes de radiación gamma conocidas y preferiblemente que abarquen un rango amplio de energía. Debido a esto también fue posible reconocer al característico fotopico de ^{40}K para considerarse en la calibración, y de esta misma manera situar a cualquier otro fotopico de interés.

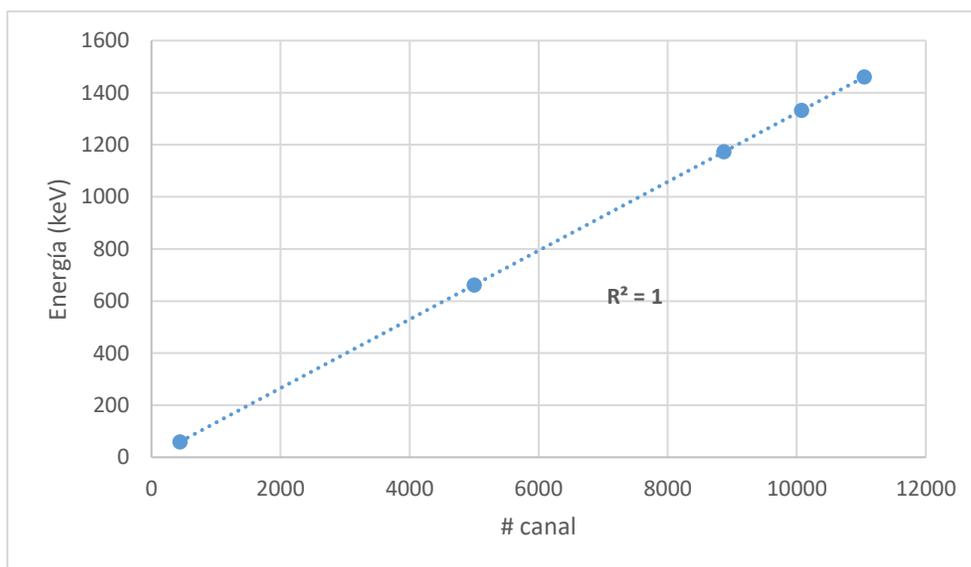


Gráfico 3. Curva de calibración

Como se ha mencionado en este trabajo, el espectro de calibración obtenido nos sirve para ajustar las energías obtenidas para los fotopicos resultantes de todos los espectros trabajados, además, la curva de calibración obtenida nos ayuda a observar la linealidad de los radioisótopos de referencia en su relación con su espectro.

Como podemos observar tenemos un valor de cercano a 1 de coeficiente de determinación lineal, lo que nos indica que tenemos una baja variabilidad de energía respecto al promedio, por lo que podemos decir que es un buen ajuste. (Martínez, 2005)

5.3. Espectros obtenidos para las muestras

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos para las muestras representados en gráficos y tablas.

5.3.1. Tomate verde

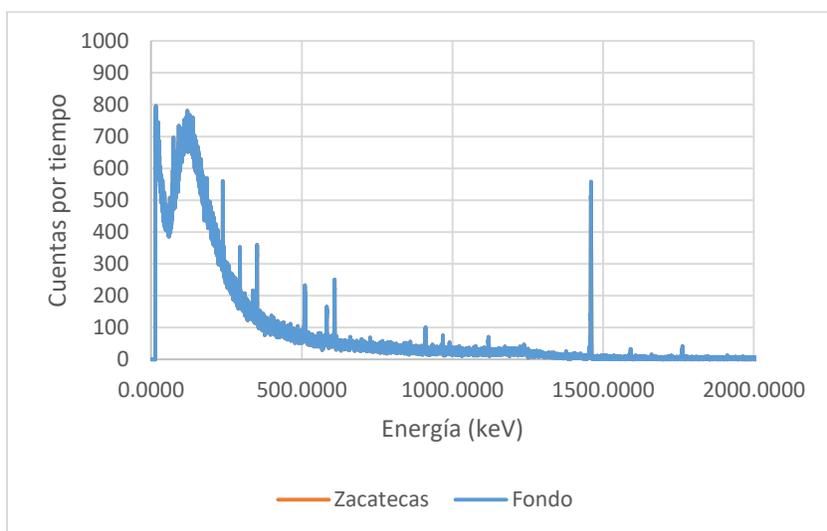


Gráfico 4. Espectro de tomate verde de Zacatecas

Tabla 20. Comparación de radioisótopos encontrados en el EF y ETVZ

Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta TVZ	Área neta fondo	Área neta ajustada	P, A o DDI
Pb 212	238.6	1615±247	1929±148	-314±288	A
Pb 214	295.2	915±195	1233±115	-318±226	A
Ac 228	338.5	360±118	562±99	-202±154	A
Pb 214	352.0	1950±220	2007±103	-57±243	A
Tl 208	510.7	2732±203	2898±100	-166±226	A
Tl 208	583.2	970±110	1047±71	-77±131	A
Bi 214	609.3	1975±194	2138±76	-163±208	A
Bi 212	727.2	292±89	272±54	20±104	DDI
Ac 228	911.0	692±109	793±58	-101±123	A
Ac 228	969.0	454±89	392±50	62±102	DDI
Bi 214	1238.2	455±86	462±51	-7±100	A
<i>K 40</i>	<i>1460.0</i>	<i>8091±144</i>	<i>4721±126</i>	<i>3370±191</i>	<i>P</i>
Bi 214	1764.0	486±44	602±36	-116±57	A

*P: Presencia, A: Ausencia, DDI: Dentro de incertidumbre

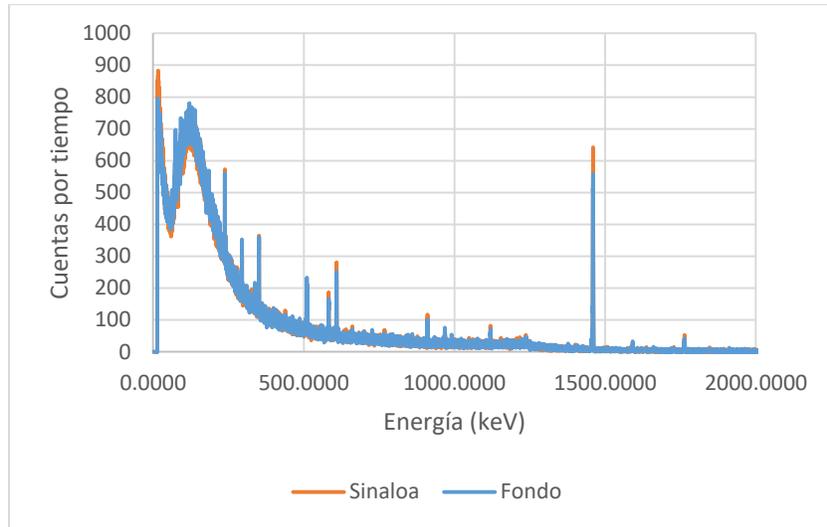


Gráfico 5. Espectro de tomate verde de Sinaloa

Tabla 21. Comparación de radioisótopos encontrados en el EF y ETVS

Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta TVS	Área neta fondo	Área neta ajustada	P, A o DDI
Pb 212	238.6	2150±369	1929±148	221±398	DDI
Pb 214	295.2	1095±158	1233±115	-138±195	A
Ac 228	338.5	401±137	562±99	-161±169	A
Pb 214	352.0	1812±192	2007±103	-195±218	A
Tl 208	510.7	2500±167	2898±100	-398±195	A
Tl 208	583.2	1259±218	1047±71	212±229	DDI
Bi 214	609.3	2179±126	2138±76	41±147	DDI
Bi 214	665.6	89±67	157±56	-68±87	A
Bi 212	727.2	189±66	272±54	-83±85	A
Ac 228	911.0	858±90	793±58	65±107	DDI
Ac 228	969.0	535±171	392±50	143±178	DDI
Bi 214	1120.4	446±75	462±51	-16±91	A
<i>K 40</i>	<i>1460.0</i>	<i>9451±117</i>	<i>4721±126</i>	<i>4730±172</i>	<i>P</i>
Bi 214	1764.0	567±42	602±36	-35±55	A

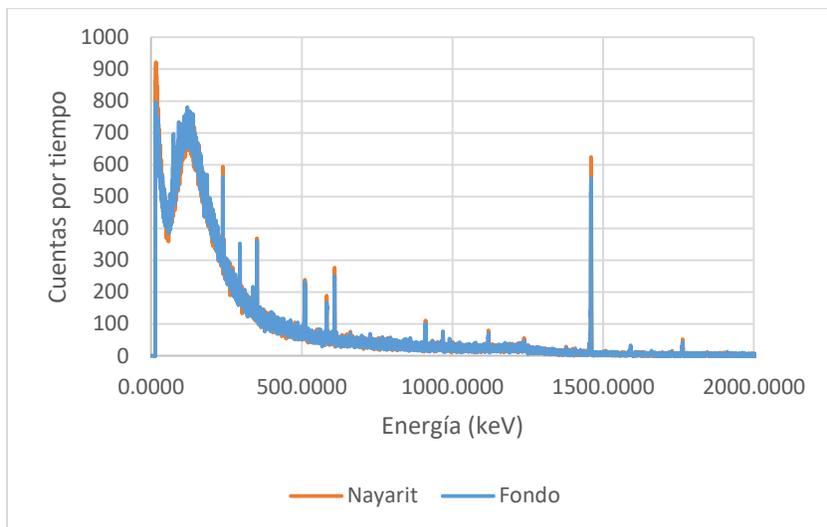


Gráfico 6. Espectro de tomate verde de Nayarit

Tabla 22. Comparación de radioisótopos encontrados en el EF y ETVN

Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta TVN	Área neta fondo	Área neta ajustada	P, A o DDI
Pb 212	238.6	2142±372	1929±148	213±400	DDI
Pb 214	295.2	1078±179	1233±115	-155±213	A
Ac 228	338.5	382±145	562±99	-180±176	A
Pb 214	352.0	1944±199	2007±103	-63±224	A
Tl 208	510.7	2045±238	2898±100	-853±258	A
Tl 208	583.2	1020±102	1047±71	-27±124	A
Bi 214	609.3	1926±126	2138±76	-212±147	A
Bi 212	727.2	208±76	157±56	51±94	DDI
Ac 228	911.0	859±100	793±58	66±116	DDI
Ac 228	969.0	254±130	392±50	-138±139	A
Bi 214	1120.4	550±80	462±51	88±95	DDI
<i>K 40</i>	<i>1460.0</i>	<i>9496±122</i>	<i>4721±126</i>	<i>4775±175</i>	<i>P</i>
Bi 214	1764.0	586±43	602±36	-16±56	A

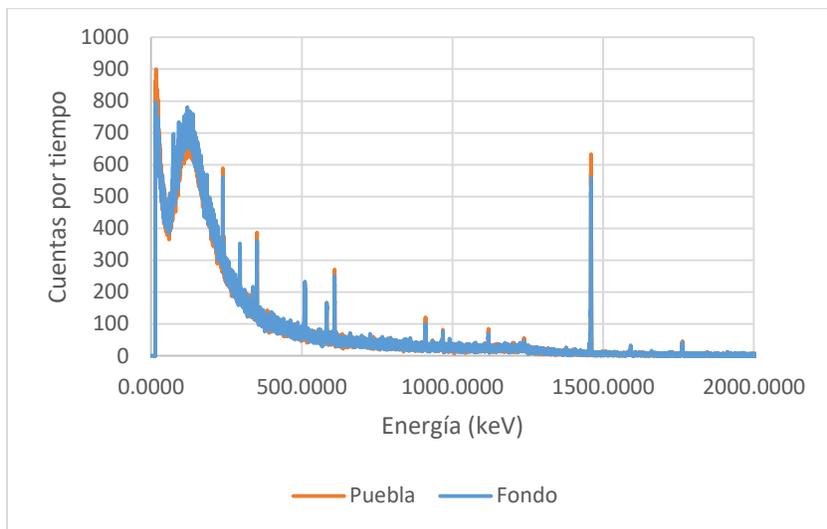


Gráfico 7. Espectro de tomate verde de Puebla

Tabla 23. Comparación de radioisótopos encontrados en el EF y ETVP

Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta TVP	Área neta fondo	Área neta ajustada	P, A o DDI
Pb 212	238.6	1584±231	1929±148	-345±274	A
Pb 214	295.2	1008±180	1233±115	-225±214	A
Ac 228	338.5	263±225	562±99	-299±246	A
Pb 214	352.0	1821±174	2007±103	-186±202	A
Tl 208	510.7	2651±205	2898±100	-247±228	A
Tl 208	583.2	1113±112	1047±71	66±133	DDI
Bi 214	609.3	2201±114	2138±76	63±137	DDI
Ac 228	911.0	839±115	793±58	46±129	DDI
Ac 228	969.0	483±104	392±50	91±115	DDI
Bi 214	1120.4	525±87	462±51	63±101	DDI
Bi 214	1238.2	229±82	172±44	57±93	DDI
<i>K 40</i>	<i>1460.0</i>	<i>9396±118</i>	<i>4721±126</i>	<i>4675±173</i>	<i>P</i>
Bi 214	1764.0	629±47	602±36	27±59	DDI

5.3.2. Pimiento morrón

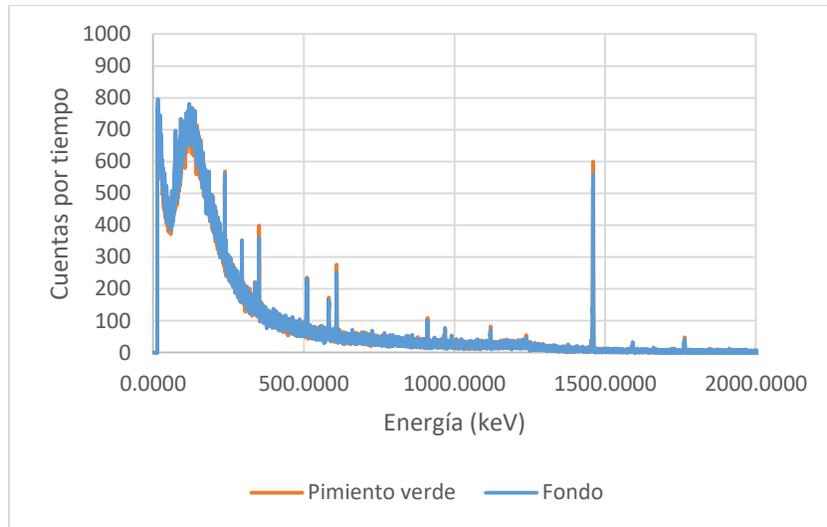


Gráfico 8. Espectro de pimiento morrón verde de Guanajuato

Tabla 24. Comparación de radioisótopos encontrados en el EF y EPMG

Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta PMVG	Área neta fondo	Área neta ajustada	P, A o DDI
Pb 212	238.6	2253±398	1929±148	324±425	DDI
Pb 214	295.2	901±193	1233±115	-332±225	A
Ac 228	338.5	303±130	562±99	-259±163	A
Pb 214	352.0	2001±182	2007±103	-6±209	A
Tl 208	510.7	2907±196	2898±100	9±220	DDI
Tl 208	583.2	1108±126	1047±71	61±145	DDI
Bi 214	609.3	2091±109	2138±76	-47±133	A
Bi 214	665.6	164±65	157±56	7±86	DDI
Bi 212	727.2	223±97	272±54	-49±111	A
Ac 228	911.0	855±127	793±58	62±140	DDI
Ac 228	969.0	413±136	392±50	21±145	DDI
Bi 214	1120.4	548±84	462±51	86±98	DDI
<i>K 40</i>	<i>1460.0</i>	<i>9139±118</i>	<i>4721±126</i>	<i>4418±173</i>	<i>P</i>
Bi 214	1764.0	608±48	602±36	6±60	DDI

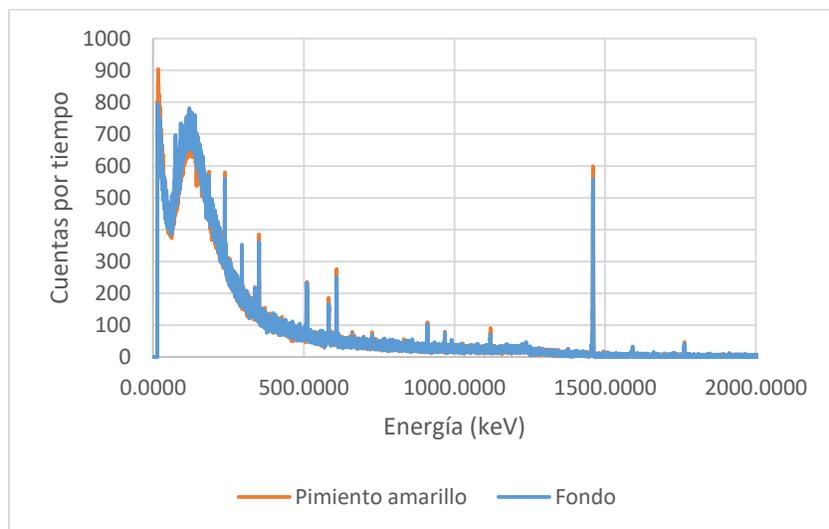


Gráfico 9. Espectro de pimienta morrón amarillo de Guanajuato

Tabla 25. Comparación de radioisótopos encontrados en el EF y EPMG

Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta PMAmG	Área neta fondo	Área neta ajustada	P, A o DDI
Pb 212	238.6	1664±261	1929±148	-265±300	A
Pb 214	295.2	977±201	1233±115	-256±232	A
Ac 228	338.5	446±119	562±99	-116±155	A
Pb 214	352.0	2142±224	2007±103	135±247	DDI
Tl 208	510.7	2962±202	2898±100	64±225	DDI
Tl 208	583.2	957±114	1047±71	-90±134	A
Bi 214	609.3	2228±138	2138±76	90±158	DDI
Bi 212	727.2	370±110	272±54	98±123	DDI
Ac 228	911.0	850±90	793±58	57±107	DDI
Ac 228	969.0	403±79	392±50	11±93	DDI
Bi 214	1120.4	541±104	462±51	79±116	DDI
<i>K 40</i>	<i>1460.0</i>	<i>9101±119</i>	<i>4721±126</i>	<i>4380±173</i>	<i>P</i>
Bi 214	1764.0	656±50	602±36	54±62	DDI

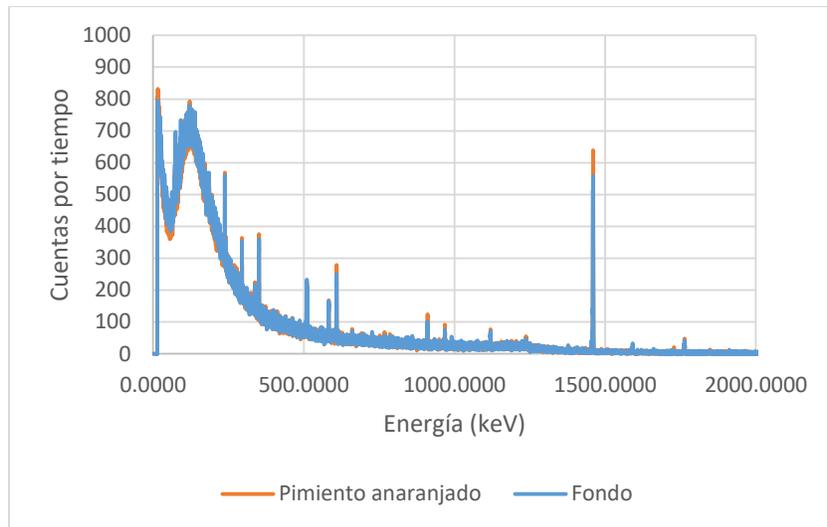


Gráfico 10. Espectro de pimienta morrón anaranjado de Guanajuato

Tabla 26. Comparación de radioisótopos encontrados en el EF y EPMG

Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta PMAng	Área neta fondo	Área neta ajustada	P, A o DDI
Pb 212	238.6	1417±264	1929±148	-512±303	A
Pb 214	295.2	822±153	1233±115	-411±191	A
Ac 228	338.5	397±157	562±99	-165±186	A
Pb 214	352.0	2096±197	2007±103	89±222	DDI
Tl 208	510.7	2851±197	2898±100	-47±221	A
Tl 208	583.2	1056±165	1047±71	9±180	DDI
Bi 214	609.3	2015±116	2138±76	-123±139	A
Ac 228	841.0	140±71	117±46	23±85	DDI
Ac 228	911.0	841±121	793±58	48±134	DDI
Ac 228	969.0	437±106	392±50	45±117	DDI
Bi 214	1120.4	480±78	462±51	18±93	DDI
<i>K 40</i>	<i>1460.0</i>	<i>9316±122</i>	<i>4721±126</i>	<i>4595±175</i>	<i>P</i>
Bi 214	1764.0	639±42	602±36	37±55	DDI

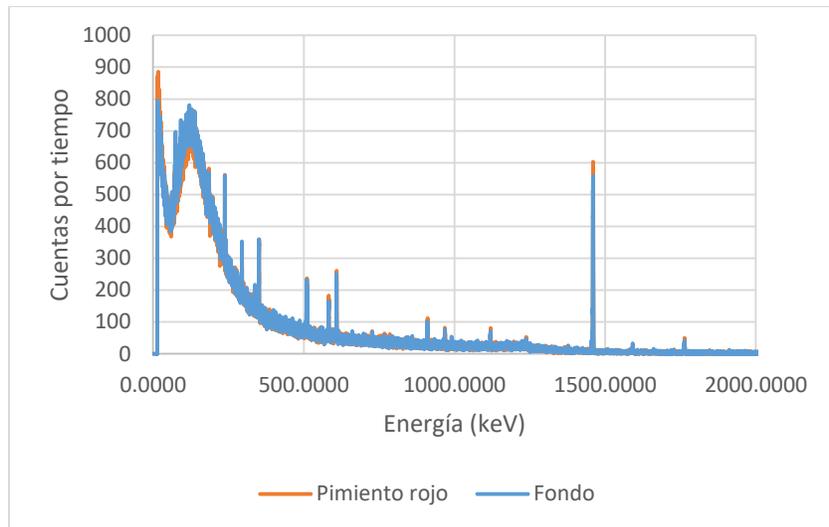


Gráfico 11. Espectro de pimienta morrón rojo de Guanajuato

Tabla 27. Comparación de radioisótopos encontrados en el EF y EPMG

Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta PMRG	Área neta fondo	Área neta ajustada	P, A o DDI
Pb 212	238.6	1143±265	1929±148	-786±304	A
Pb 214	295.2	1029±191	1233±115	-204±223	A
Ac 228	338.5	284±119	562±99	-278±155	A
Pb 214	352.0	2078±189	2007±103	71±215	DDI
Tl 208	510.7	2683±194	2898±100	-215±218	A
Tl 208	583.2	1090±116	1047±71	43±136	DDI
Bi 214	609.3	1874±106	2138±76	-264±130	A
Bi 214	665.6	112±69	157±56	-45±89	A
Bi 212	727.2	287±84	272±54	15±100	DDI
Ac 228	841.0	132±92	117±46	15±103	DDI
Ac 228	911.0	880±90	793±58	87±107	DDI
Ac 228	969.0	340±106	392±50	-52±117	A
Bi 214	1120.4	485±70	462±51	23±87	DDI
Bi 214	1238.2	76±46	172±44	-96±64	A
<i>K 40</i>	<i>1460.0</i>	<i>9073±131</i>	<i>4721±126</i>	<i>4352±182</i>	<i>P</i>
Bi 214	1764.0	648±59	602±36	46±69	DDI

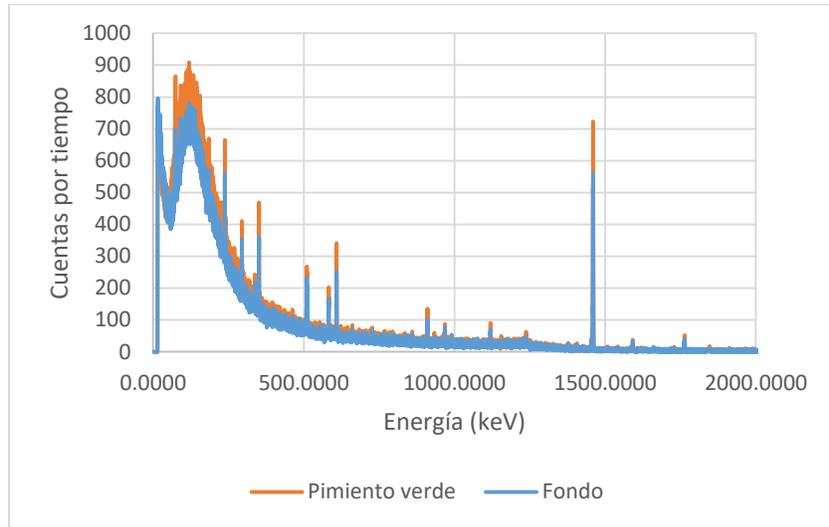


Gráfico 12. Espectro de pimienta morrón verde de Sinaloa

Tabla 28. Comparación de radioisótopos encontrados en el EF y EPMS

Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta PMVS	Área neta fondo	Área neta ajustada	P, A o DDI
Pb 212	238.6	2371±456	1929±148	442±479	DDI
Pb 214	295.2	1151±208	1233±115	-82±238	A
Ac 228	338.5	447±151	562±99	-115±181	A
Pb 214	352.0	2127±140	2007±103	120±174	DDI
Tl 208	510.7	3051±185	2898±100	153±210	DDI
Tl 208	583.2	1127±121	1047±71	80±140	DDI
Bi 214	609.3	2179±145	2138±76	41±164	DDI
Bi 214	665.6	187±122	157±56	30±134	DDI
Bi 212	727.2	225±99	272±54	-47±113	A
Ac 228	911.0	906±99	793±58	113±115	DDI
Ac 228	969.0	524±159	392±50	132±167	DDI
Bi 214	1120.4	549±150	462±51	87±158	DDI
Bi 214	1238.2	80±44	172±44	-92±62	A
<i>K 40</i>	<i>1460.0</i>	<i>9841±119</i>	<i>4721±126</i>	<i>5120±173</i>	<i>P</i>
Bi 214	1764.0	659±58	602±36	54±68	DDI

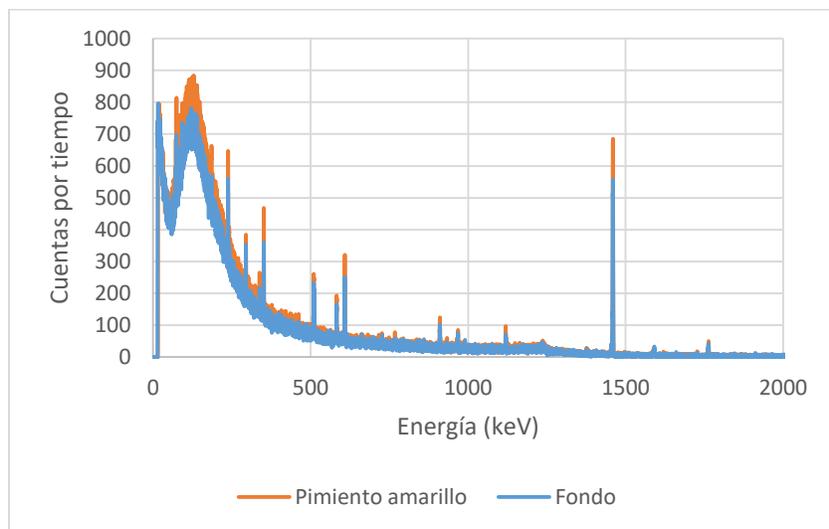


Gráfico 13. Espectro de pimienta morrón amarillo de Sinaloa

Tabla 29. Comparación de radioisótopos encontrados en el EF y EPMS

Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta PMAmS	Área neta fondo	Área neta ajustada	P, A o DDI
Pb 212	238.6	2324±425	1929±148	395±450	DDI
Pb 214	295.2	1091±168	1233±115	-142±204	A
Ac 228	338.5	465±150	562±99	-97±180	A
Pb 214	352.0	2031±200	2007±103	24±225	DDI
Tl 208	510.7	2938±204	2898±100	40±227	DDI
Tl 208	583.2	1037±116	1047±71	-10±136	A
Bi 214	609.3	2130±125	2138±76	-8±146	A
Ac 228	911.0	913±120	793±58	120±133	DDI
Ac 228	969.0	522±165	392±50	130±172	DDI
Bi 214	1120.4	524±89	462±51	62±103	DDI
<i>K 40</i>	<i>1460.0</i>	<i>9832±117</i>	<i>4721±126</i>	<i>5111±172</i>	<i>P</i>
Bi 214	1764.0	667±56	602±36	65±67	DDI

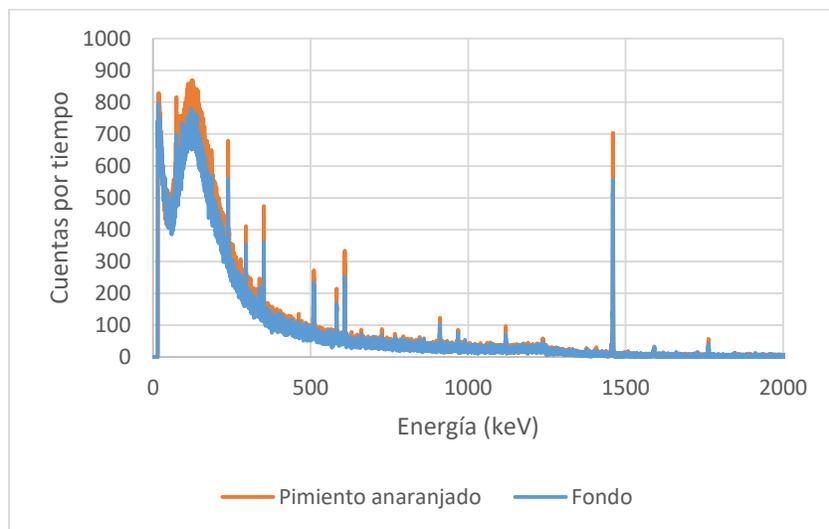


Gráfico 14. Espectro de pimienta morrón anaranjado de Sinaloa

Tabla 30. Comparación de radioisótopos encontrados en el EF y EPMS

Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta PMA nS	Área neta fondo	Área neta ajustada	P, A o DDI
Pb 212	238.6	2231±409	1929±148	302±435	DDI
Pb 214	295.2	1063±183	1233±115	-170±216	A
Ac 228	338.5	540±188	562±99	-22±212	A
Pb 214	352.0	2025±204	2007±103	18±229	DDI
Tl 208	510.7	3011±298	2898±100	113±314	DDI
Tl 208	583.2	1137±113	1047±71	90±133	DDI
Bi 214	609.3	2162±112	2138±76	24±135	DDI
Bi 212	727.2	348±106	272±54	76±119	DDI
Ac 228	841.0	66±68	117±46	-51±82	A
Ac 228	911.0	905±101	793±58	112±116	DDI
Ac 228	969.0	532±173	392±50	140±180	DDI
Bi 214	1120.4	569±105	462±51	107±117	DDI
Bi 214	1238.2	135±157	172±44	-37±160	A
<i>K 40</i>	<i>1460.0</i>	<i>9755±132</i>	<i>4721±126</i>	<i>5034±182</i>	<i>P</i>
Bi 214	1764.0	655±47	602±36	53±59	DDI

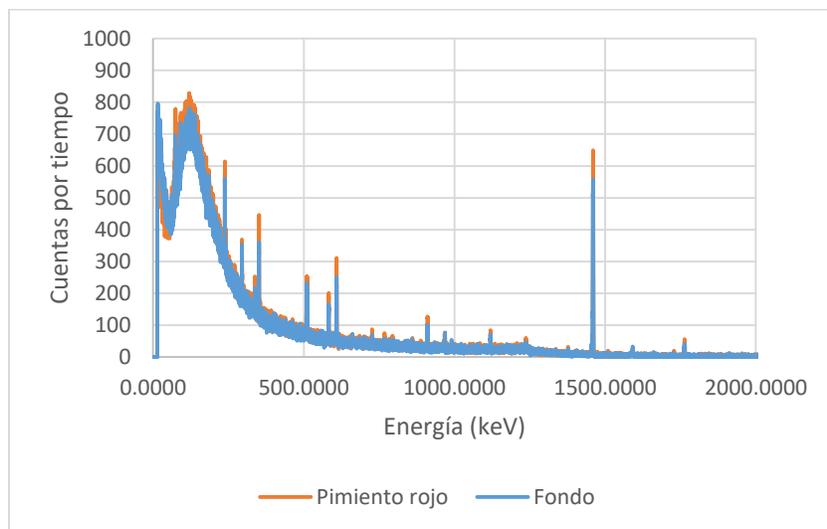


Gráfico 15. Espectro de pimienta morrón rojo de Sinaloa

Tabla 31. Comparación de radioisótopos encontrados en el EF y EPMS

Radioisótopo	Energía (keV)	Área neta PMRS	Área neta fondo	Área neta ajustada	P, A o DDI
Pb 212	238.6	2245±475	1929±148	316±498	DDI
Pb 214	295.2	1149±244	1233±115	-84±270	A
Ac 228	338.5	401±143	562±99	-161±174	A
Pb 214	352.0	1887±239	2007±103	-120±260	A
Tl 208	510.7	3031±194	2898±100	133±218	DDI
Tl 208	583.2	1121±114	1047±71	74±134	DDI
Bi 214	609.3	2141±129	2138±76	3±150	DDI
Ac 228	841.0	147±69	117±46	30±83	DDI
Ac 228	911.0	900±135	793±58	107±147	DDI
Ac 228	969.0	321±116	392±50	-71±126	A
Bi 214	1120.4	511±115	462±51	49±126	DDI
Bi 214	1238.2	122±87	172±44	-50±97	A
<i>K 40</i>	<i>1460.0</i>	<i>9767±122</i>	<i>4721±126</i>	<i>5046±175</i>	<i>P</i>
Bi 214	1764.0	568±51	602±36	-34±62	A

Como se puede observar en cada una de las tablas, no existe contenido radiológico artificial y natural de importancia. El único fotopico y su área neta ajustada que se hace presente es el de potasio 40, por lo que procederemos a calcular el contenido de este en cada una de las muestras analizadas.

5.4. Análisis de un estándar de potasio

Para conocer el contenido total de potasio es cada muestra es necesario conocer la eficiencia de detección del equipo.

Es por ello que se eligió un estándar de KCl en polvo, cuya masa de potasio es conocida. Al ser analizados se obtuvieron los datos de interés, que son las cuentas del área gruesa y las cuentas del área neta.

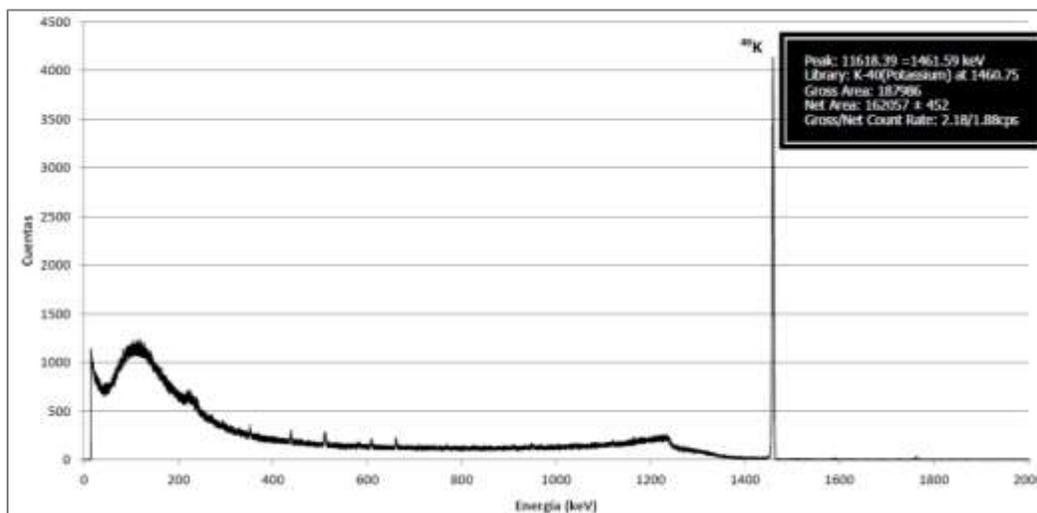


Figura 36. Espectro obtenido para un estándar de KCl (Padilla, 2013)

5.4.1. Eficiencia de conteo

Para evaluar la eficiencia de conteo se requiere colocar un estándar de potasio en el detector, y dado que teóricamente se conoce la concentración de potasio en éste, se procede a verificar la capacidad del equipo para cuantificar las interacciones de la radiación gamma generadas por el decaimiento de los núcleos de ⁴⁰K a ⁴⁰Ar con el detector de HPGe, lo que a su vez indicará el contenido neto de potasio que cuantificó el espectrómetro gamma. (Fabián, 2016)

5.4.2. Cálculo del contenido de potasio en un estándar de KCl

Actividad específica de potasio (A_K)

$$A_K = \frac{N_A a \ln 2}{100 M T_{1/2}} = \frac{(6.022 \times 10^{23})(0.0118) (\ln 2)}{(100)(39.0983 \text{ g/mol})(4.037 \times 10^{16} \text{ s})} = 31.2055 \text{ Bq/g}$$

Donde:

N_A =Número de Avogadro

a =Abundancia isotópica de ^{40}K (%)

M =Masa atómica de potasio

$T_{1/2}$ =Tiempo de vida media de ^{40}K

Eficiencia de conteo del equipo (Ef)

$$\% Ef = \frac{A_{neta} - A_{neta \text{ fondo}}}{A_K A_\gamma m_K t_a} = \frac{(162057 - 4721)}{(31.2055 \text{ Bq/g})(0.11)(192.2627 \text{ g K})(86400 \text{ s})} \times 100$$

$$= 0.2759 \%$$

Donde:

A_{neta} =Área neta de ^{40}K (del estándar)

$A_{neta \text{ fondo}}$ = Área neta de ^{40}K en el fondo

A_γ =% de radiación gamma de decaimiento de ^{40}K a ^{40}Ar

m_K =Masa de potasio en el estándar

t_a =Tiempo de análisis

$$366.6 \text{ g KCl} \left| \frac{1 \text{ mol KCl}}{74.5513 \text{ g KCl}} \right| \frac{1 \text{ mol K}}{1 \text{ mol KCl}} \left| \frac{39.0983 \text{ g K}}{1 \text{ mol K}} \right| = 192.2627 \text{ g K}$$

Tabla 32. Resultados del análisis de eficiencia de conteo

Estándar	g KCl	g K	Área neta de ^{40}K (del estándar)	Área neta de ^{40}K en el fondo	% Eficiencia
KCl sólido	366.6000	192.2627	162057±452	4721±126	0.2759

Comprobación

Dado que se obtuvo un 0.2759% de eficiencia del equipo se procede a calcular la actividad específica de los 366.6000 g del estándar de KCl analizado:

$$A_{SK} = \frac{\frac{A_{neta} - A_{neta\ fondo}}{t_a}}{m_{KCl} Ef A_\gamma} = \frac{\frac{(162057 - 4721)}{86400\ s}}{(366.6000\ g\ KCl)(0.002759)(0.11)} = 16.3673\ Bq/g$$

Donde:

A_{SK} = Actividad específica de los 366.6000 g utilizados del estándar

m_{KCl} = Masa de KCl utilizada en el análisis

Ef = Eficiencia (no porcentual)

Para obtener los gramos de potasio cuantificados por el equipo en los 366.6000 g de KCl analizados:

$$m_K = \frac{16.3673\ Bq/g}{31.2055\ Bq/g} \times 366.6000\ g\ KCl = 192.2819\ g\ K$$

Teóricamente 192.2627 g de los 366.6000 g corresponden al potasio y el restante a cloro y posibles impurezas. Si en el detector de HPGe se cuantificaron 192.2819 g de potasio, entonces el equipo tiene un porcentaje de error (% E) de:

$$\% E = \left| \frac{192.2627 - 192.2819}{192.2627} \right| \times 100 = 0.0100\ %$$

Los cálculos anteriores nos permiten observar que el detector HPGe empleado tiene un 0.2759 % de eficiencia para la determinación de potasio, de una forma confiable y precisa ya que se registra un porcentaje de error de tan solo 0.0100%.

5.5. Contenido de potasio total en las muestras

Los diversos espectros obtenidos del análisis de las diferentes muestras de tomate verde y pimiento morrón nos permiten conocer los valores del área neta bajo la curva de cada fotopico observable, especialmente del fotopico de ^{40}K , siendo los valores obtenidos dependientes del contenido de potasio en cada muestra.

5.5.1. Cálculo del contenido de potasio en las muestras

Para el siguiente apartado se tomarán para ejemplo de cálculo los datos obtenidos para el tomate verde de Zacatecas.

Actividad específica de las muestras

$$A_{TVZ} = \frac{A_{na}/t_a}{m_{mu}EfA_\gamma} = \frac{(3370/86400 \text{ s})}{(500 \text{ g}_{TVZ})(0.002759)(0.11)} = 0.2570 \text{ Bq/g}_{TVZ}$$

Donde:

A_{na} =Área neta ajustada de ^{40}K

m_{mu} =Masa de la muestra

Ef =Eficiencia

Concentración porcentual de potasio

$$\% \text{ K} = \frac{A_{TVZ}}{A_K} \times 100 = \frac{0.2570 \text{ Bq/g}}{31.2055 \text{ Bq/g}} \times 100 = 0.8236 \%$$

mg de Potasio/100 g de TV (base húmeda)

$$\frac{0.8236 \text{ g K}}{100 \text{ g}_{TVZ}} \left| \frac{1000 \text{ mg K}}{1 \text{ g K}} \right. = 823.6 \text{ mg K}/100 \text{ g}_{TVZ}$$

5.5.2. Tomate verde

Tabla 33. Contenido de potasio en tomate verde

Muestra	Masa de la muestra (g)	Área neta ajustada	Actividad específica de Tomate verde (Bq/g)	Actividad específica de Tomate verde (Bq/kg)	% Potasio (g de K/100 g de TV)	mg de Potasio/100 g de TV (base húmeda)
Zacatecas	500±0.1	3370±191	0.2570	257.0	0.8236	823.6
Sinaloa		4730±172	0.3608	360.8	1.1562	1156.2
Nayarit		4775±175	0.3642	364.2	1.1671	1167.1
Puebla		4675±173	0.3566	356.6	1.1427	1142.7

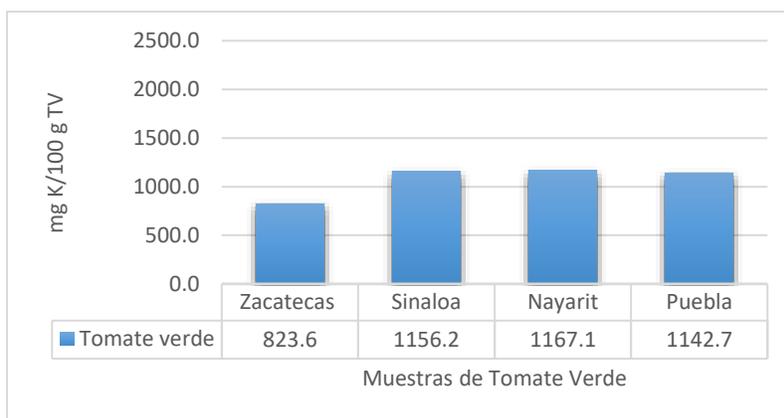


Gráfico 16. Comparación entre muestras de tomate verde

5.5.3. Pimiento morrón

Tabla 34. Contenido de potasio en pimiento morrón

Muestra	Masa de la muestra (g)	Área neta ajustada	Actividad específica de Pimiento morrón (Bq/g)	Actividad específica de Pimiento morrón (Bq/kg)	% Potasio (g de K/100 g de PM)	mg de Potasio/100 g de PM (base húmeda)
Guanajuato PMV	350±0.1	4418±173	0.4814	481.4	1.5427	1542.7
PMAm		4380±173	0.4773	477.3	1.5295	1529.5
PMAñ		4595±175	0.5007	500.7	1.6045	1604.5
PMR		4352±182	0.4742	474.2	1.5196	1519.6
Sinaloa PMV	300±0.1	5120±173	0.6509	650.9	2.0859	2085.9
PMAm		5111±172	0.6497	649.7	2.0820	2082.0
PMAñ		5034±182	0.6399	639.9	2.0506	2050.6
PMR		5046±175	0.6415	641.5	2.0557	2055.7

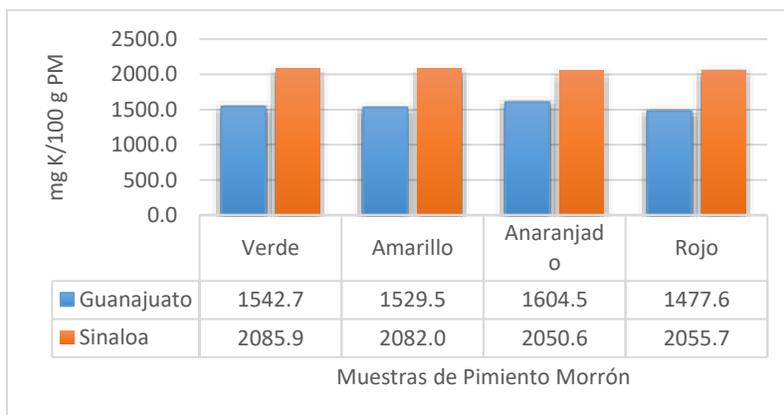


Gráfico 17. Comparación entre muestras de pimiento morrón

El análisis de los resultados obtenidos se podrá observar en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO SEXTO: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

6.1. Análisis de resultados

Como ya se ha mencionado, el programa MAESTRO-32 v6 ORTEC® nos otorga los datos correspondientes al área bajo la curva de los fotopicos encontrados en cada uno de los espectros. A partir de dicha información se puede conocer el contenido radiológico artificial y natural de las muestras analizadas.

El espectro de fondo utilizado en el presente trabajo nos muestra un total de 16 fotopicos, pertenecientes a las cadenas de decaimiento natural de uranio 238 y torio 232 con la presencia de plomo, actinio, talio y bismuto con todas sus energías de emisión características.

En cuanto a la obtención del espectro de calibración se puede observar una regresión lineal equivalente a 1, por lo que podemos afirmar que los espectros obtenidos posteriormente caen dentro de una buena linealidad del sistema.

Una vez obtenidos dichos espectros se hizo una comparación fotopico a fotopico entre las muestras y el fondo para conocer el contenido radiológico real en el tomate verde y pimiento morrón analizados.

Se analizaron cuatro muestras de tomate verde de diferentes estados (Zacatecas, Sinaloa, Nayarit y Puebla). En las tablas 20 a 23 del capítulo de resultados se puede observar el contenido radiológico detectado en las muestras. Resaltando principalmente la ausencia de material artificial producto de accidentes nucleares o conflictos bélicos.

Posteriormente analizamos el contenido radiológico natural y se puede observar la ausencia de los hijos de las cadenas de decaimiento natural, o con un contenido que recae dentro de la incertidumbre asociada al fotopico, por lo que el alimento será apto y seguro para consumo humano en cuanto a contenido radiológico se refiere.

El único radioisótopo presente fue el de potasio 40. Al realizar el análisis y comparación con la eficiencia de conteo, utilizando un estándar de potasio, se realizaron los cálculos correspondientes y obtuvimos los valores correspondientes de potasio total para las cuatro muestras.

En la tabla 33 se pueden observar los resultados en Bq/kg (actividad de potasio 40), que al ser un radioisótopo de baja severidad, ni siquiera tiene un límite máximo permisible reportado por la FAO. También se tiene el contenido de potasio total en mg/100 g donde podemos observar

una diferencia evidente entre los valores obtenidos y los reportados en la literatura, con 823.6 mg/100 g (Zacatecas), 1156.2 mg/100 g (Sinaloa), 1167.1 mg/100 g (Nayarit) y 1142.7 mg/100 g (Puebla) contra 204.0 mg/100 g como valor promedio reportado.

En cuanto al pimiento morrón, se analizaron dos estados: Guanajuato y Sinaloa con 4 muestras de diferentes colores (verde, amarillo, anaranjado y rojo). Las tablas 24 a 27 muestran los resultados de contenido radiológico para el estado de Guanajuato, mientras que las tablas 28 a 31 muestran los referentes a Sinaloa. En ambos conjuntos de tablas se puede observar la ausencia de contenido radiológico artificial.

Después, podemos ver que el material natural recae dentro de su incertidumbre asociada o ausencia, por lo que, al igual que el tomate verde, podemos considerar que los pimientos analizados son aptos y seguros para consumo humano en cuanto a contenido radiológico se refiere.

Se puede observar la presencia de potasio 40 en los pimientos de ambos estados, siendo Sinaloa quien registra valores mayores, aunque ambos grupos difieren de forma evidente con los 175.0 mg/100 g reportados en la literatura. El estado de Sinaloa reporta valores de 1542.7 mg/100 g (verde), 1529.5 mg/100 g (amarillo), 1604.5 mg/100 g (anaranjado) y 1519.6 mg/100 g (rojo), mientras que el estado de Guanajuato se registraron contenidos de 2085.9 mg/100 g (verde), 2082.0 mg/100 g (amarillo), 2050.6 mg/100 g (anaranjado) y 2055.7 mg/100 g (rojo).

Como se puede observar, en ambos grupos de hortalizas se obtuvieron valores diferentes a los registrados en la literatura para el contenido de potasio total.

El potasio es un elemento fundamental para el correcto desarrollo de las plantas, aumentando de forma significativa su número y tamaño, y es indispensable para aumentar el rendimiento en las cosechas. Es por ello que forma parte de diversos fertilizantes, además de encontrarse de forma natural en los suelos. Dichos fertilizantes pueden contener principalmente potasa y cloruro de potasio. (FAO, 1992)

Por lo anterior, podemos suponer que el uso de fertilizantes en suelos de cosecha aumentó de forma significativa el contenido de potasio en las hortalizas analizadas, *ya que el potasio es absorbido por la plantas con mayor facilidad incluso que el nitrógeno* (FAO, 1992). Con esto, la siguiente incógnita que se plantea sería la biodisponibilidad de este potasio total en el cuerpo humano.

De forma general, el contenido radiológico encontrado en las hortalizas analizadas tienen un comportamiento similar al registrado en la literatura, ya que la presencia de contaminantes radiológicos artificiales en los alimentos, como ya se ha mencionado, están directamente relacionados con actividad humanos y los accidentes nucleares o conflictos bélicos que se

presenten en las regiones de interés para el análisis. Aunque los resultados obtenidos no podrían definir a las matrices alimentarias completas de los estados analizados debido a la dificultad que representa el muestreo a distancia debido a las cadenas de distribución, se puede tener la noción del contenido radiológico en dichas tierras de cultivo.

En los casos cuyas matrices alimentarias se encuentran materiales radiológicos artificiales, se debe recurrir a los análisis de patrones certificados de los radioisótopos de interés, similares a los utilizados en el espectro de calibración, y comparar los valores de actividad específica con los límites máximos permisibles en la Norma general del Codex para los Contaminantes y las Toxinas Presentes en los Alimentos y iensos (CODEX STAN 193-1995).

Por otro lado, este trabajo podría formar parte de un atlas alimentario y de la posible creación de un protocolo estandarizado de análisis de contenido radiológico en matrices alimentarias, cubriendo las necesidades de la industria alimentaria para la verificación de contaminantes radiológicos en alimentos y la inocuidad alimentaria de estos.

6.2. Conclusiones

+Se realizó el análisis de contenido radiológico de hortalizas (tomate verde y pimiento morrón) mediante espectrometría gamma, obteniendo:

- Ausencia de contenido radiológico artificial de interés: ^{239}Pu , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I .
- Contenido radiológico natural proveniente de las cadenas de ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th dentro de incertidumbre o ausente.
- Presencia de ^{40}K en las 4 muestras de tomate verde y en las 8 muestras de pimiento morrón analizadas

+El análisis de contenido radiológico mediante un detector HPGe es de gran importancia debido a que permite la medición de todo el espectro de energías en una matriz alimentaria (de 0 a 2.5 MeV).

+Para la cuantificación de contenido radiológico artificial y su actividad específica es necesario contar con patrones certificados para cada radioisótopo de interés.

+Debido a su alta eficiencia y resolución, el detector de germanio hiperpuro es el recomendado por instituciones internacionales, como la FAO. Y asociado al MCA y al software MAESTRO-32 v6 ORTEC®, el análisis es automatizado, evitando así el error asociado al analista y al manejo.

+El presente trabajo aporta un protocolo de análisis para la determinación del contenido radiológico mediante espectrometría gamma, de matrices alimentarias, específicamente de hortalizas. Es así que se puede utilizar en caso de emergencia nuclear o la medición de contenido en alimentos de importación y exportación para el cumplimiento de la normativa pertinente.

+Siguiendo la línea de investigación, el presente protocolo puede trasladarse a la determinación de contenido radiológico en otras matrices alimentarias. Y una vez obtenidos los resultados por región se puede obtener un atlas agroalimentario cuya utilidad radica en ser un marco de referencia en caso de accidentes nucleares o alteraciones ambientales.

ANEXOS

A.1. Unidades

a: Abundancia	kcal: Kilocalorías
Bq: Becquerel	kev: kilo electrón volt
Bq/g: Becquerel por gramo	m: metro
Bq/kg: Becquerel por kilogramo	meq/L: Miliequivalentes por litro
Ci: Curio	MeV: Mega electrón volt
cm: centímetro	mg: Miligramos
eV: Electrón volt	mg/día: Miligramos por día
g: Gramos	s: segundo
g/mol: gramos por mol	V: Volt
h: hora	uma: Unidad de masa atómica
J: Joule	

A.2. Glosario

Actividad: Se refiere al número de núcleos que se desintegran por unidad de tiempo, cuya unidad dada por el Sistema Internacional (SI) es el Bq.

ADC: Convertidor analógico digital, del inglés (*Analogic Digital Converter*).

Becquerel: Es la unidad del Sistema Internacional que representa a la actividad radiactiva.

Centroide: Es la parte central de un fotopico de interés en unidades de energía o canales.

Cuentas: Número de pulsos registrados por segundo para una energía específica.

Eficiencia: Es la relación entre pulsos y número dado de emisiones gamma.

Energía de un fotón: Cuando la luz es absorbida por la materia, la energía retenida es una cantidad específica o cuanto, mejor conocido como fotón.

Espectro: Distribución energética de radiaciones gamma emitidas por una muestra, producida por la interacción entre un detector y acondicionada por el sistema electrónico, desplegada por el MCA.

eV: El electrón volt es la unidad para la medición de energía proveniente de fuentes radiactivas. Se refiere a la energía cinética obtenida mediante la aceleración de un electrón a través de una diferencia de potencial de 1 V.

Fotopico: Función gaussiana de un espectro que es producida por las interacciones radiactivas de energía por el efecto fotoeléctrico con los materiales del detector.

HPGe: Germanio hiperpuro, del inglés (*Hyper Pure Germanium*).

Ionización: Proceso por el cual un átomo o molécula con carga neutra gana o pierde electrones y adquiere una nueva carga.

MCA: Analizador multicanal, del inglés (*Multi Chanel Analyzer*).

NAP: Área neta del fotopico, del inglés (*Net Area of Photopeak*). Se refiere al número de cuentas del área bajo la curva de un fotopico de interés. Es obtenida mediante la resta de las cuentas de una muestra menos las cuentas del fondo.

Radiactivo: Propiedad de un cuerpo cuyos átomos pueden desintegrarse espontáneamente, emitiendo una energía característica.

Resolución: Es la capacidad del detector para discriminar fotopicos cercanos (de energía muy similares).

ROI: Región de interés, del inglés (*Region of Interest*).

Semiconductor: Se trata de un material que se comporta como conductor o aislante dependiendo de la temperatura al que es sometido.

Tiempo de respuesta: Es el tiempo que transcurre desde que el fotón impacta el detector y la generación de una respuesta medible e interpretable.

BIBLIOGRAFÍA

American Chemical Society, 2005. *Química: Un proyecto de la American Chemical Society*. Barcelona.

Bárceñas, M., 2010. El programa de vigilancia radiológica ambiental del centro nuclear. México.

Barrera, M., 2008. *Puesta a punto de un sistema de espectrometría gamma para la determinación de Cs-137 en suelos españoles*. Madrid.

Beiser, A., 2003. *Concepts of modern physics*. Nueva York.

Cánovas Picón, F., 2006. *Datación radiactiva*. España.

CNSNS. *¿Qué hacemos?*

Disponible en:

<https://www.gob.mx/cnsns/que-hacemos> [Último acceso el junio de 2018].

Codex Alimentarius Commission, 2017. *Norma general del Codex para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos (Codex Stan 193-1995)*.

Codex Alimentarius Commission, 2004. *Contaminants: Guideline levels for radionuclides on food following accidental nuclear contamination for use in international trade, suplemental to Codex Alimentarius Vol. XVII*. Roma.

Espinosa García, G.C., 2013. *Radiación ambiental y radiación de fondo*. Distrito Federal. IFUNAM.

Espinosa García, G.C., 2016. *Gas radón en cuevas: Su origen, medición, distribución, y sus posibles riesgos y/o beneficios en salud pública*. Distrito Federal: IFUNAM. ISBN 978-607-02-7822-8

FAO, 1987. *Report of the expert consultation on recommended limits for radionuclide contamination of food*. Roma.

FAO, 1992. *Los fertilizantes y su uso*. París.

FAO, 2011. *Producción de hortalizas. Proyecto: Ayuda humanitaria de asistencia y recuperación para comunidades afectadas por la sequía en el Chaco*. Bolivia.

Foro nuclear, 2002. *¿Qué es la radiactividad?* Madrid.

Gimferrer Morató, N., 2011. *Riesgo radiológico en los alimentos*. [En línea](25 de julio de 2011).

Disponible en:

<http://www.consumer.es/seguridad-alimentaria/ciencia-y-tecnologia/2011/07/25/201954.php> [Último acceso el 14 de septiembre de 2016].

Guerrero Salazar, J., 2013. *Efecto de la concentración de potasio en la calidad fisiológica de semilla de tomate de cáscara (Physalis ixocarpa Brot.) en invernadero*. San Luis Potosí.

Halliday, D., et. al., 1994. *Física Vol 1 y 2*. Distrito Federal.

IAEA, 1989. *Measurement of radionuclides in food and the environment. A guide book*. Viena.

IAEA, 2017. *Evaluación de la contaminación en la agricultura*. Viena.

Disponible en:

<https://www.iaea.org/topics/assessment-of-contamination-in-agriculture> [Último acceso junio de 2018].

ICRP. *Acerca de ICRP*.

Disponible en:

<http://www.icrp.org/> [Último acceso junio de 2018].

INCMNSZ, 2016. *Tablas de composición de alimentos y productos alimenticios mexicanos (Versión condensada 2015)*. Ciudad de México. ISBN 978-607-7797-19-7

Knoll, G., 2010. *Radiation detection and measurement*. USA

Latham, M., 2002. *Nutrición humana en el mundo en desarrollo*. Roma. ISBN 92-5-303818-7

Leal, B., 2004. *Determinación de la eficiencia de detección de un detector HPGe mediante el código de simulación MCNP 4A*. Zacatecas.

Martínez Rodríguez, E., 2005. *Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal*. Madrid.

Mataix Lorda, M., 1999. *Diccionario de electrónica, informática y energía nuclear*. Madrid.

México en tu mesa, 2014. *Tomate verde (Miltomate)*. [En línea](Marzo de 2014).

Disponible en:

<http://mexicoentumesa.mx/productos/tomate.html> [Último acceso el 14 de septiembre de 2016].

NASA, 2001. *Definition of an electron volt*. [En línea](Noviembre de 2001).

Disponible en:

https://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2001/comment2_ast15jan_1 [Último acceso noviembre del 2017].

ONU, 2016. *Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección*. [En línea](Abril de 2016).

Disponible en:

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/> [Último acceso septiembre de 2017]

Ramírez Jiménez, F. J., 2010. Instrumentación electrónica nuclear. *Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México*. Edición conmemorativa. Capítulo 22.

Riveroll, M., 1998. *Estudio comparativo entre la radiactividad natural y la contaminación radiactiva en alimentos*. Distrito Federal

REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE SALUD EN MATERIA DE CONTROL SANITARIO DE ACTIVIDADES, ESTABLECIMIENTOS, PRODUCTOS Y SERVICIOS.

Disponible en:

<http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/compi/rlgsmcsaeps.html> [Último acceso junio de 2017]

SAGARPA, 2014. *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. México.

SAGARPA, 2016. *Atlas agroalimentario 2016. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. México.

SAGARPA, 2017. *Atlas agroalimentario 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. México.

SAGARPA, 2017. *5to Informe de labores 2016-2017*. México.

Disponible en:

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/255710/5TO INFORME 2017 web.pdf> [Último acceso marzo de 2018]

Secretaría de Energía, 1988. *Reglamento general de seguridad radiológica*. Distrito Federal.

Sequera, P., 2016. *Transtornos del potasio*. España.

Disponible en:

<http://revistanefrologia.com/es-monografias-nefrologia-dia-articulo-trastornos-del-potasio-20> [Último acceso marzo de 2018]

Servín Rodas, M. del C., 2013. *Nutrición básica y aplicada*. Distrito Federal.

Sistema Nacional de Investigación y Transferencia Tecnológica para el Desarrollo Rural y Sustentable, 2016. *Agenda Nacional de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología Agrícola 2016-2022*. Distrito Federal.

Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura, 2016. [En línea](Abril de 2016).

Disponible en:

<http://www.sinarefi.org.mx/macrohortalizas.html> [Último acceso noviembre de 2017]

UNSCEAR. Hitos históricos. [En línea](31 de mayo de 2016)

Disponible en:

http://www.unscear.org/unscear/about_us/history.html [Último acceso junio de 2018]

Tesis

Espinosa Muñiz, J. C., 2013. *Estudio de contaminantes radiológicos en cereales y leguminosas mediante técnicas nucleares*. Distrito Federal.

Fabián Martínez, E. D., 2016. *Estudio y determinación mediante métodos nucleares del contenido total de potasio y los posibles contaminantes radiactivos en el café mexicano*. Distrito Federal.

Florián Guzmán, A., 2016. *Estudio y caracterización de contenidos y posibles contaminantes radiológicos en vegetales: Lechuga (*Latuca sativa*), Jitomate (*Solanum lycopersicum*) y Brócoli (*Brassica olearacea itálica*), mediante técnicas nucleares*. Distrito Federal.

Hernández Burgos, E. I., 2012. *Análisis de las concentraciones de potasio en leche y fórmulas lácteas comerciales mediante espectrometría gamma, usando un detector de germanio hiperpuro*. Distrito Federal.

Padilla Soriano, E., 2013. *Estudio del contenido de potasio en nopal mexicano (*Opuntia ficus indica*), mediante métodos nucleares*. Distrito Federal.

Sánchez Martínez, S., 2017. *Estudio y análisis de contaminantes radiológicos en maíz (*Zea mays*) y frijol (*Phaseolus vulgaris L*) en diferentes variedades y tipos, por métodos nucleares*. Ciudad de México.

Valle Márquez, V., 2016. *Estudio y análisis de contaminantes radiológicos en aguas potables embotelladas comerciales por métodos nucleares*. Distrito Federal.

Vilchis Lugo, B., 2016. *Estudio mediante técnicas nucleares, de contaminantes radiológicos en carne de pollo de engorda procesado*. Distrito Federal.

Villarreal Noguera, I. del C., 2017. *Estudio de contaminantes radiológicos en productos cárnicos y quesos seleccionados, mediante espectrometría gamma*. Ciudad de México.