



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“ESTUDIO Y ANÁLISIS DE CONTAMINANTES
RADIOLÓGICOS EN AGUACATE, POR MÉTODOS
NUCLEARES”**

TESIS

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

PRESENTA

ALINE ITZEL HERNÁNDEZ SÁNCHEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. GUILLERMO CIRANO ESPINOSA GARCÍA

ASESOR TÉCNICO

JOSÉ IGNACIO GOLZÁRRI MORENO



Ciudad Universitaria, CD. MX., 2021



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.

Agradecimientos

Agradezco al Proyecto de Aplicaciones de Dosimetría del Instituto de Física de la UNAM (PAD-IFUNAM), por el apoyo y las facilidades de laboratorio, así como el apoyo del proyecto PAPIIT-IN-102819 de la UNAM.

Índice

Introducción	1
Objetivos	3
Capítulo 1. Aspectos fundamentales del aguacate	
1.1 Antecedentes generales	4
1.2 Aguacate	4
1.2.1 Componentes del aguacate	6
1.2.2 Composición nutricional de la pulpa de aguacate	6
1.3 Producción, comercialización y consumo de aguacate	10
1.4 Aspectos generales de potasio	14
1.5 Normatividad nacional e internacional sobre contaminantes radiológicos en alimentos	15
Capítulo 2. Aspectos fundamentales de Física de radiaciones	
2.1 Antecedentes generales	18
2.2 Decaimiento radiactivo	19
2.3 Unidades	20
2.4 Núclidos	21
2.5 Vida media	21
2.6 Radioisótopos	22
2.7 Interacción de la radiación electromagnética con la materia	27
2.8 Fuentes naturales y artificiales de radiación ionizante	29
2.8.1 Cadenas de decaimiento radiactivo de radiación natural	31
2.9 Contaminación de alimentos por elementos radiactivos	35
2.9.1 Efectos en la salud	38
2.10 Métodos de medición de contenido radiológico	41
2.10.1 Espectrometría gamma	43
2.10.2 Detector de Germanio Hiperpuro (HPGe)	43
Capítulo 3. Metodología	
3.1 Selección de muestras	46
3.2 Calibración de energía	49
3.3 Espectro de fondo	50
3.4 Preparación de la muestra	51
3.5 Espectro de la muestra	52
3.6 Análisis de un fotopico	53
3.7 Análisis de contenido radiológico en las muestras	56
3.8 Cálculo de potasio total en la muestra	58

Capítulo 4. Instrumentación

4.1 Detector semiconductor de Germanio Hiperpuro (HPGe)	60
4.1.1 Blindaje del detector	62
4.2 Contenedor de la muestra	63
4.3 Sistema electrónico	63
4.3.1 Fuente de alto voltaje	64
4.3.2 Preamplificador	64
4.3.3 Amplificador	64
4.3.4 Analizador Multicanal (MCA)	65
4.3.5 Equipo de cómputo	65

Capítulo 5. Resultados, discusión y conclusiones

5.1 Calibración de energía	67
5.2 Espectro de fondo	69
5.3 Espectros de las muestras	70
5.3.1 Aguacate Hass Michoacán	71
5.3.2 Aguacate Hass Estado de México	72
5.3.3 Aguacate Hass “Tienda”	73
5.3.4 Aguacate Criollo	74
5.3.5 Pagua	75
5.4 Potasio total presente en las muestras	76
5.5 Discusión	80
5.6 Conclusiones	84
5.7 Recomendaciones	85

Anexos

A.1 Unidades de radiactividad	86
A.2 Cálculos para determinar potasio total en una muestra de interés	88

Glosario	92
--------------------------------	----

Referencias	94
-----------------------------------	----

Introducción

La radiactividad es una propiedad de ciertos elementos con núcleos atómicos inestables que, mediante la emisión de radiación, alcanzan un equilibrio energético. Esta radiación, es la transmisión de energía en forma de partículas u ondas electromagnéticas y se encuentra en el medio ambiente, en alimentos, piensos, agua potable, incluso, en nuestro cuerpo. Puede ser de origen natural (radiación cósmica, de la corteza terrestre, los alimentos) o artificial, como consecuencia de actividades humanas (técnicas médicas, instalaciones o accidentes nucleares).

Los elementos que emiten radiación, se denominan radioisótopos (o elementos radiactivos), éstos pueden liberarse al medio ambiente y llegar a productos alimenticios de la dieta humana a través de la cadena alimentaria, ya sea de forma natural o por algún incidente nuclear.

El ser humano se encuentra continuamente expuesto a elementos radiactivos naturales en una dosis estable e inevitable, la ingesta de éstos, provoca una exposición a la radiación, que está fuertemente relacionada con la concentración, tipo y tiempo de vida media de los radioisótopos presentes. La presencia de contenido radiactivo, dependerá de varios factores como la geología local, prácticas agrícolas y condiciones ambientales particulares de cada región.

El monitoreo de alimentos para detectar radiactividad, juega un papel importante tanto a nivel comercial como en el ámbito de la salud, ya que el consumo de niveles altos de radiación, tiene un efecto adverso en la salud de las personas, debido a que los elementos radiactivos pueden acumularse en el cuerpo y ejercer efectos tóxicos. Los radioisótopos más comunes en alimentos presentes de forma natural son: potasio-40 (^{40}K), radio-226 (^{226}Ra) y productos del decaimiento de uranio y torio; de origen artificial, los más importantes debido a que representan un riesgo potencial para la producción de alimentos, si se liberan en cantidades elevadas son: estroncio-90 (^{90}Sr), cesio-137 (^{137}Cs) y yodo-131 (^{131}I).

Todos los componentes de la dieta contienen el radioisótopo ^{40}K . El potasio es un mineral indispensable para el organismo, ya que participa en procesos fisiológicos como la regulación osmótica, la presión sanguínea y se mantiene en concentraciones constantes mediante procesos metabólicos. El potasio-40, es su isótopo radiactivo, constituye el 0.012% de la cantidad total de potasio que se encuentra en la naturaleza, siendo la mayor fuente de radiactividad natural en el cuerpo.

Este trabajo se desarrolló en el Instituto de Física de la UNAM, donde se estudió y analizó la presencia de contaminantes radiológicos en aguacate por métodos nucleares. Se planteó utilizar el método de espectrometría gamma, aprobado por la FAO, para la identificación de isótopos radiactivos naturales o artificiales, usando como instrumentación un detector de Germanio Hiperpuro, el cual permite obtener en una prueba, todo el material radiactivo presente en la muestra.

Se seleccionó analizar el aguacate por su importancia comercial, ya que México es líder en el mercado a nivel mundial, siendo la fruta más exportada del país y la de mayor consumo per-cápita, con 16 kg al año.

Se han reportado pocos trabajos de investigación sobre la calidad radiológica de los alimentos en México o son limitados los datos radiológicos detallados. Las regulaciones y los sistemas de respuesta a emergencias, deben actualizarse y adaptarse, por lo que este estudio proporciona datos de referencia para establecer estándares que puedan garantizar, que el consumo y comercio nacional e internacional, sea seguro en cuanto a contenido radiológico.

Se pretende que esta investigación sirva de base para la creación de un protocolo de detección de contaminantes radiológicos.

Objetivos

Objetivo general

Analizar y determinar el contenido de radioisótopos de origen natural o artificial en aguacate, proponiendo una metodología basada en la espectrometría gamma, la cual permite detectar la presencia de contaminantes radiológicos en este fruto, con la finalidad de que el aguacate que se consume, a nivel nacional o internacional, cumpla con las normas de seguridad radiológica.

Objetivos particulares

- Determinar si el aguacate analizado, es seguro para el consumo humano, en cuanto a contenido radiológico.
- Plantear la técnica de espectrometría de radiación gamma, para la detección y determinación de radioisótopos en aguacate.
- Proponer una metodología para la cuantificación de contaminantes radiológicos, si se encuentran presentes significativamente en el alimento, en particular de potasio.
- Proponer este trabajo como un marco de referencia para posteriores evaluaciones, ya sea en caso de alguna emergencia nuclear o bien, que sirva de base para el desarrollo de un protocolo para la certificación de contaminantes radiológicos en una matriz alimentaria.
- Evaluar la importancia del análisis de contaminación radiológica, para garantizar alimentos seguros para la población.

Capítulo I

Aspectos fundamentales del aguacate

1.1. Antecedentes generales

El aguacate es el cultivo de mayor exportación del país, seguido del tomate rojo y pimiento. México es líder mundial en el mercado de aguacate, siendo el principal exportador con el 40% y el de mayor consumo per-cápita, con 16 kg al año (SAGARPA, 2017).

El Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (2017) estima que, en el mundo, 1 de cada 3 aguacates se cosechan en México. Se utiliza principalmente en la alimentación, ya que contiene proteínas, grasas, carbohidratos, fibra, vitaminas A, C, E, B y diversos minerales como calcio, magnesio, potasio, fósforo y hierro. De su rica materia grasa, pueden extraerse aceites que una vez procesados, son utilizados en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica.

La importancia del aguacate en el mercado internacional va en aumento, ya que su consumo es cada vez mayor, tanto en su estado fresco como procesado.

1.2. Aguacate




El árbol de aguacate es originario de México y América Central (Guatemala y el Caribe), pertenece a la familia *Lauraceae*, género *Persea*, que contiene especies como *Persea americana* y *Persea schiedeana*. El árbol es de tronco grueso y hojas alargadas, tiene varias ramificaciones que generan un follaje denso y en sus zonas de origen puede alcanzar alturas desde 10 a 30 m, aunque en plantaciones comerciales generalmente no se deja crecer más de 5 metros para facilitar las prácticas fitosanitarias, cosecha, poda y recolección. Se considera un cultivo perenne porque se cultiva en todo el año (Monografía de cultivos, 2011).

Existe una gran variedad de aguacates con características particulares. El fruto puede presentar múltiples formas: oblata, esferoide, elipsoide, angosto, claviforme, romboide, periforme, ovoide o globoso. El color de la cáscara puede ser verde claro, verde oscuro,

morado o negro de apariencia lisa, papilada, rugosa, lustrosa u opaca, y el peso total del fruto puede variar entre los 120 y 500 g. La semilla puede tener superficie lisa, intermedia y rugosa; el color de la pulpa puede ser marfil, amarillo, amarillo claro, amarillo intenso, verde claro y verde (Pérez *et al.*, 2005; Bernal *et al.*, 2014).

Las variedades de aguacate analizadas se muestran en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1. Características de las variedades de aguacate analizadas

		Variedad		
		Hass	Criollo	Pagua
Principales características		Frutos de tamaño mediano, de forma ovoide a piriforme; la cáscara es mediana a gruesa, de textura rugosa y corchosa, superficie áspera y granulosa, de color verde que se oscurece al madurar, tornándose morada a negra; la pulpa es cremosa de color amarillo con un contenido de grasa del 17-21 %	Frutos de cuello largo, cáscara lisa y bajo contenido de aceite. Tiene un alto contenido de fibra, semilla muy grande, producción tardía y árboles de porte muy alto, que dificultan su cosecha.	El color de la cáscara puede ser verde, negro café o morado. La pulpa es fibrosa. El contenido de aceites totales oscila entre 24.7-36%
Imágenes				

Pérez et al., 2005; Bernal et al., 2014; imágenes tomadas en PAD-IFUNAM

La variedad Hass es el fruto principal que se cultiva en todo el mundo, llegando a aportar el 80% de los aguacates que se consumen, debido a la alta calidad de su pulpa, a su mayor productividad, a su madurez más tardía y a la capacidad de almacenamiento por periodos relativamente largos. La variedad Criollo, posee resistencia a plagas y enfermedades, por lo que representa una fuente de experimentación para el mejoramiento de la especie. La especie Pagua, es exclusiva de zonas cálidas de México y es de gran importancia en huertos familiares como árbol de sombra en algunos cafetales (Cruz *et al.*, 2007).

1.2.1. Componentes del aguacate

Algunos autores como Bernal *et al.* (2014), consideran que el fruto del árbol de aguacate es una drupa carnosa con una sola semilla, constituida por epicarpio (cáscara), mesocarpio (pulpa) y endocarpio (semilla). Otros autores como Barrientos *et al.* (1996), proponen que es una baya con tres capas: el exocarpio (cáscara), mesocarpio pulposo (parte comestible de la fruta), y una capa interna delgada junto a la cubierta de la semilla que corresponde al endocarpio. La relación cáscara: semilla: pulpa, difieren de acuerdo a la variedad de aguacate, origen e incluso, estado de maduración (**Tabla 1.2**).

Tabla 1.2. Proporción general de cáscara, pulpa y semilla en el aguacate.

Componente	Contenido %
Cáscara	12-15
Pulpa	60-64
Semilla	12-28

1.2.2. Composición nutricional de la pulpa de aguacate

El aguacate es una fruta climatérica oleaginosa rica en nutrimentos. La composición nutricional de la pulpa de aguacate, depende de factores como la variedad, condiciones agronómicas, estado de post cosecha y maduración de la fruta. En México, el nivel mínimo de grasa para la cosecha de aguacate es de 15% en la etapa de maduración (Ortiz *et al.*, 2003).

De acuerdo a Ezzeddine (2017), los nutrimentos principales se muestran en la Tabla 1.3:

Tabla 1.3. Composición general de la pulpa de aguacate.

Nutriente/ fitoquímico	En 100 g
Agua (g)	72.3
Energía (kcal)	167
Proteínas (g)	1.96
Lípidos totales (g)	15.4
Ácidos grasos saturados (g)	2.13
16:0 (g)	2.08
Ácidos grasos monoinsaturados (g)	9.80
18:1 (g)	9.07
Colesterol (mg)	0.0
Carbohidratos (g)	8.64
Fibra (g)	6.80
Azúcar (g)	0.30
Almidón (g)	0.11
Minerales	
Fósforo (mg)	54.0
Sodio (mg)	8.0
Potasio (mg)	507
Calcio (mg)	13.0
Magnesio (mg)	29.0
Hierro (mg)	0.61
Vitaminas y fitoquímicos	
Vitamina C (mg)	8.80
Tiamina (mg)	0.08
Riboflavina (mg)	0.14
Niacina (mg)	1.91
Ácido pantoténico (mg)	1.46
Vitamina B6 (mg)	0.29
Folato (µg)	89.0
Colina (mg)	14.2
Vitamina A (µg)	7.0
β-caroteno (µg)	63.0
γ-caroteno (µg)	24.0
β-criptoxantina (µg)	27.0
Luteína+ zeaxantina (µg)	271
Vitamina E (α-tocoferol) (mg)	1.97
Vitamina K (µg)	21.0
Estigmasterol (mg)	2.0
Campesterol (mg)	5.0
B-sitosterol (mg)	76.0

El aguacate es un fruto que contiene en promedio 65-75% de agua, alto porcentaje de grasa 15-20% peso fresco, altos niveles de fibra y minerales como potasio.

La fracción lipídica de la pulpa de aguacate posee alrededor del 60-72% de ácidos grasos moninsaturados (como ácido oléico y palmitoléico); de 11-15% son poliinsaturados (como ácido linoléico “Omega-6” y linolénico “Omega-3”), los cuales se obtienen exclusivamente de la dieta, por lo que se les considera ácidos grasos indispensables; y entre 10 y 19% son saturados como ácido palmítico, que disminuye cuando el fruto madura (Robayo, A., 2016).

En la pulpa de aguacate, predomina el ácido oléico y linoléico, que tienen un efecto positivo en el organismo, ya que incrementan el colesterol HDL y disminuyen el colesterol LDL (*Ortiz et al., 2003*).

El contenido de carbohidratos se distribuye en fibra (6.8%), almidón (0.11%) y azúcar total (0.3%). Entre los azúcares presentes, destacan las heptosas como D-manoheptulosa, azúcar mayoritario en el mesocarpio del aguacate y perseitol, compuesto de almacenamiento de azúcar; en menor medida se encuentra sacarosa, glucosa y fructosa. Es una fruta con niveles apreciables de fibra, ya que contiene varios polisacáridos estructurales, incluyendo celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina (Ceballos y Montoya, 2013).

A pesar de que el aguacate posee un porcentaje bajo de proteína, contiene siete aminoácidos esenciales: valina, lisina, fenilalanina, isoleucina, leucina, treonina y metionina (Ortega, 2003).

El aguacate es rico en compuestos bioactivos con actividad antioxidante como vitamina E, flavonoides, carotenoides y esteroides, los cuales ayudan a prevenir daños oxidativos, ya que están asociados con la reducción de la incidencia de enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas y cánceres (Ezzeddine, 2017).

En el mesocarpio del aguacate, los fitoesteroides (esteroides vegetales) más abundantes son β -sitosterol, campesterol y estigmasterol. Estos compuestos son análogos del colesterol y precursores de las vitaminas D₂ (ergocalciferol) y D₃ (colecalfiferol) por irradiación con luz. Estos compuestos, son alcoholes poliisoprenoides, caracterizados por uno o dos átomos de carbono extra como sustituyentes de la cadena lateral de colesterol. Son importantes en la

regulación de calcio en los animales y favorecen la salud cardiovascular, bloqueando la absorción intestinal del colesterol (Robayo, 2016).

El aguacate contiene cantidades apreciables de vitamina E (α -tocoferol). Los tocoferoles son antioxidantes liposolubles esenciales en la dieta porque no pueden ser sintetizados por el organismo; tienen la habilidad de reemplazar los radicales libres en las membranas celulares, protegiendo a los ácidos grasos poliinsaturados de la oxidación (Urango *et al.*, 2009).

Contiene vitaminas como: A, D, B₁, B₂, B₃, B₅, ácido fólico y biotina, así como cantidades moderadas de B₆ y vitamina C; ésta última, tiene un efecto protector en la oxidación celular, ya que es capaz de reducir el número de radicales libres producidos durante procesos metabólicos. Un consumo alto de vitamina C, proporciona menor riesgo de padecer enfermedades crónicas tales como cáncer, diabetes, enfermedades del corazón y de tipo neurodegenerativo (Ezzeddine, 2017).

Los carotenoides que se encuentran en el mesocarpio del aguacate son principalmente β -criptoxantina, luteína y zeaxantina. Son un grupo de pigmentos vegetales liposolubles, capaces de proteger a las células de daños producidos por el efecto de la luz UV y las especies reactivas de oxígeno; asimismo, una dieta regular que incluya frutas y vegetales ricos en estos pigmentos, podrían ayudar en la prevención de la aparición de enfermedades cardiovasculares (Urango *et al.*, 2009).

Con respecto a compuestos fenólicos, la pulpa es rica en ácidos hidroxibenzoicos, ácidos hidroxicinámicos y procianidinas; la piel y semilla son ricas en catequinas (98% epicatequinas), flavonoles y ácidos hidroxicinámicos (ácido clorogénico y neoclorogénico). El contenido de estos compuestos, también está determinado por la variedad de aguacate y la etapa de maduración (Ezzeddine, 2017).

1.3. Producción, comercialización y consumo de aguacate

- Producción de aguacate

En la **Figura 1.1**, se presenta la producción de aguacate a nivel mundial, donde México es el principal productor con más de dos millones de toneladas al año (33.6% de la producción mundial), seguido de República Dominicana y Perú, con 10.5% y 7.7% respectivamente (FAOSTAT, 2017).

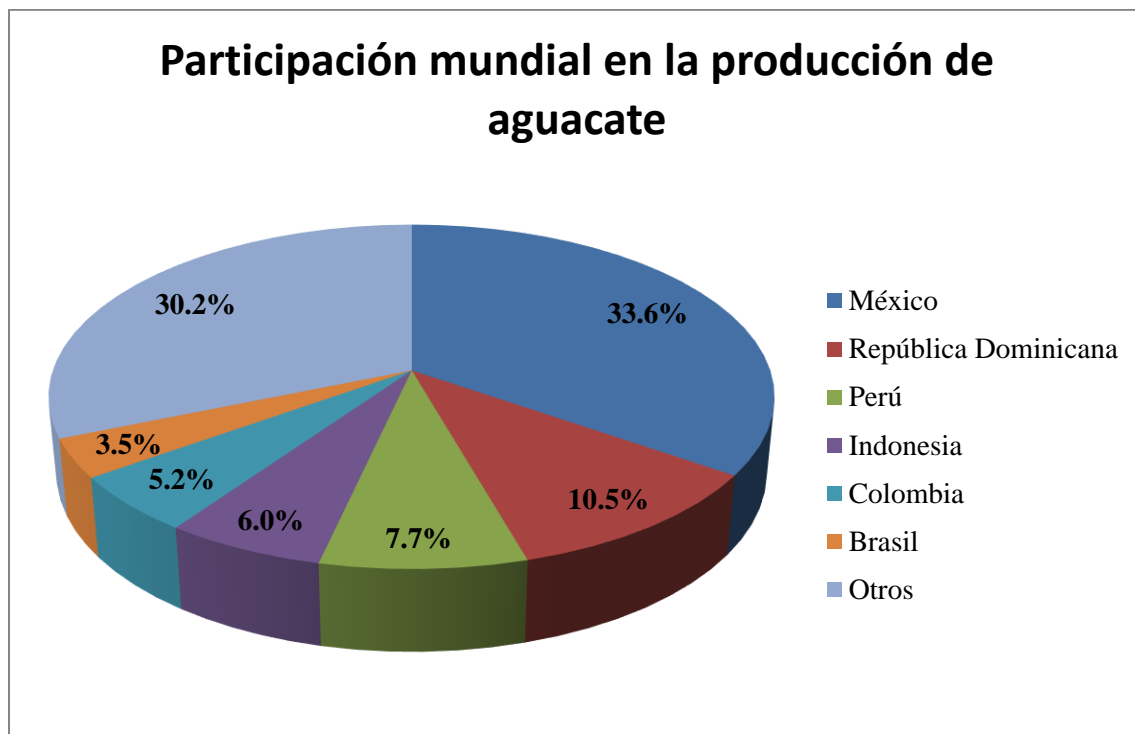


Figura 1.1. Representación en porcentajes de la producción mundial de aguacate (FAOSTAT, 2017)

Michoacán concentra 74.8% del volumen de producción de aguacate en México (Figura 1.2), ya que produce casi dos millones de toneladas al año. Otras entidades que tienen participación son: Jalisco, Estado de México, Nayarit, Morelos y Guerrero. En la **Tabla 1.4**, se muestra la producción en toneladas en orden decreciente y en la **Figura 1.2**, se observa en porcentajes.

Tabla 1.4. Producción de aguacate por entidad federativa (SAGARPA, 2019)

Posición	Estado	Producción (toneladas)	Variación 2018-2019
	Nacional	2,186,376	5.6
1	Michoacán	1,725,213	2.6
2	Jalisco	231,613	1.3
3	México	117,326	0.6
4	Nayarit	67,077	0.4
5	Morelos	53,339	0.3
6	Guerrero	26,563	0.01
7	Puebla	17,018	0.1
8	Chiapas	16,596	-0.01
9	Oaxaca	11,921	0.1
10	Yucatán	10,773	0.1
	Otros	30,532	0.1

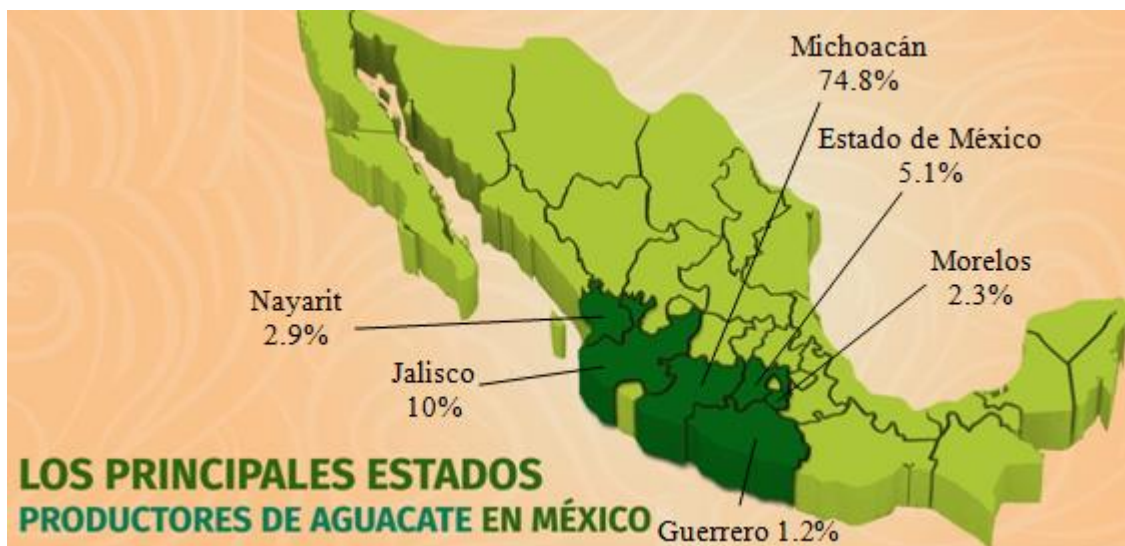


Figura 1.2. Participación a nivel nacional estados productores de aguacate en México (SAGARPA, 2019)

- Comercialización de aguacate

Antes de la fase de comercialización, se deben aplicar ciertas normas establecidas para la selección y exportación del producto. La cuestión sanitaria del aguacate en el país ha ido mejorando, con el fin de aumentar la calidad de este producto e impulsar así, la exportación del mismo.

Las normas nacionales e internacionales vigentes, aplicables al cultivo de aguacate, se encuentran en la **Tabla 1.5**. Estas normas hacen referencia a las características sensoriales del fruto, es decir si posee defectos en la forma, coloración, cáscara o pulpa, así como especificaciones de envasado y etiquetado para su comercialización.

Tabla 1.5. Normas nacionales e internacionales aplicables para aguacate

Norma	Descripción
Nacionales	
NOM-066-FITO-2002	Especificaciones para el manejo fitosanitario y movilización del aguacate
NOM-128-SCFI-1998	Información Comercial-Etiquetado de productos agrícolas-Aguacate.
NMX-F-052-SCFI-2008	Aceites y Grasas- Aceite de Aguacate-Especificaciones.
NMX-FF-016-SCFI-2016	Productos Alimenticios no industrializados para uso humano-fruta fresca-aguacate Hass (<i>Persea americana</i> Mill)- especificaciones (cancela a la NMXFF-016-SCFI-2006)
Internacionales	
CODEX STAN 197-1995	Norma del CODEX para el aguacate

En México se producen alrededor de dos millones de toneladas anuales, de las cuales cerca de un millón se queda en México, 800 toneladas se distribuyen en Estados Unidos y otros países.

México exporta aguacate a diversos países que se muestran en la **Figura 1.3**, donde Estados Unidos es el principal comprador. Recientemente Japón ha incrementado la demanda del fruto mexicano, país que ocupa el 2° lugar en volumen de compras, seguido de Canadá, España, Francia, Holanda, El Salvador, China, Honduras y Hong Kong. En la actualidad, Australia, Argentina, y Letonia, se perfilan como destinos potenciales para el aguacate que se produce en el país (CEDRSSA, 2017).

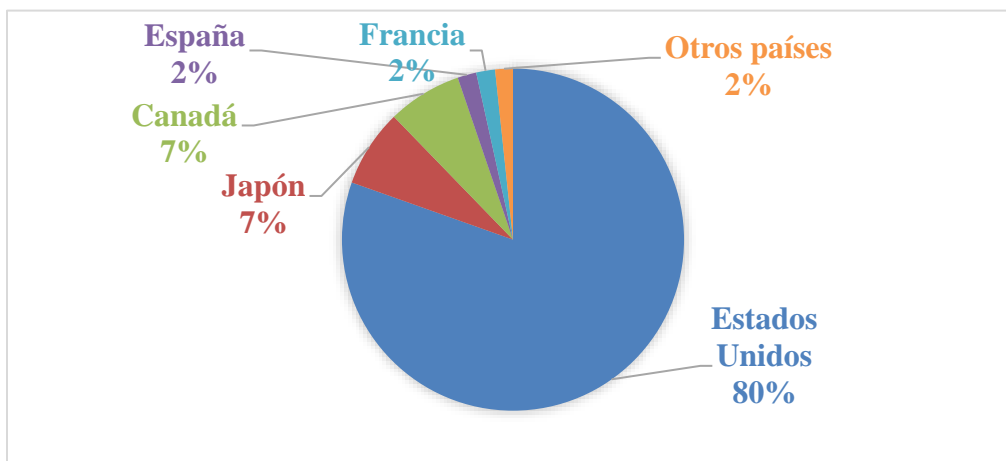


Figura 1.3. Principales países importadores de aguacate mexicano (CEDRSSA, 2017)

Desde la apertura comercial de México con Estados Unidos (1997), trajo consigo un acelerado crecimiento de los productores del cultivo. La importancia económica de esta actividad, reside en la generación de empleos y sus vínculos indirectos con otras actividades. Toda la cadena genera 187 mil empleos directos, en beneficio de más de 70 mil familias, según información de la Asociación de Productores y Empacadores Exportadores de Aguacate de México (APEAM) (CEDRSSA, 2017).

- Consumo de aguacate

La cosecha se realiza durante todo el año, especialmente entre diciembre y agosto, aprovechando el clima de varias zonas del país. La mayor parte de las importaciones se realizan entre julio y febrero, meses en los cuales aparentemente también disminuye la demanda, posiblemente debido a los precios más altos que se paga por los aguacates importados (SAGARPA, 2017).

Actualmente se satisface 100% de los requerimientos nacionales con la producción interna, lo que ha generado un incremento en las exportaciones mexicanas principalmente con destino a Estados Unidos, Japón y Canadá.

Con relación al incremento general de precios al consumidor, este se encuentra en línea con lo observado en los mercados de campo y de mayoreo, solo fluctuando de forma estacional, es decir, aumentando en los meses de menor cosecha y disminuyendo en aquellos de mayor producción.

1.4. Aspectos generales de potasio

El potasio es uno de los minerales más abundantes de la corteza terrestre, constituye cerca del 2.4% en peso de la tierra. Es un elemento esencial para todos los seres vivos, por lo que su presencia en el ambiente y en los alimentos es imprescindible, ya que participa en procesos biológicos como transmisión del impulso nervioso, control de presión sanguínea, movimiento muscular, entre otros. Mediante procesos metabólicos, el contenido de potasio en el organismo se mantiene constante, aproximadamente la concentración promedio en el cuerpo es de 2000 ppm. En alimentos, por lo general la concentración de potasio se encuentra entre 1000 a 6000 ppm, es decir entre 1000-6000 mg de potasio por kilogramo de alimento (IAEA, 2002). Se encuentra en una gran variedad de alimentos como frijoles, guisantes, frutos secos, espinacas, perejil y frutas como papaya, plátano y dátil.

La OMS recomienda una ingesta de potasio de al menos 3,510 mg/día en adultos y una disminución de sodio en la dieta, para reducir la tensión arterial y riesgo de enfermedades cerebrovasculares y cardiopatías en adultos. Esta cantidad dependerá de la edad y sexo del individuo (OMS, 2019).

Una deficiencia grave de potasio, conocida como hipocalemia, presenta síntomas como estreñimiento, cansancio, debilidad muscular e indisposición. El bajo consumo de potasio, también puede reducir el calcio de los huesos y aumentar la cantidad de calcio en la orina, llegando a desarrollar cálculos renales (NIH, 2019).

El exceso de potasio se elimina por la orina, ya que el organismo tiene la capacidad de absorber sólo la cantidad que necesita y desechar la sobrante. Si existe alguna enfermedad como diabetes, insuficiencia renal o cardíaca, puede ocurrir la hipercalemia, incluso cuando se consumen cantidades típicas de potasio en alimentos (NIH, 2019).

El potasio presente en la naturaleza está compuesto por la mezcla de tres isótopos: ^{39}K , ^{40}K y ^{41}K con porcentajes en masa del 93.3%, 0.012% y 6.7%, respectivamente. El ^{40}K es el único inestable y es uno de los radionúclidos primordiales, debido a su largo periodo de semidesintegración (1.277×10^9 años), ya que está presente en la corteza e interior de la Tierra desde su formación. Es abundante en suelos y agua, responsable de la radiactividad en los alimentos y la principal fuente de radiación interna.

El potasio-40 se descompone en ^{40}Ca , emitiendo una partícula beta sin radiación gamma asociada (89% de las veces), y en gas ^{40}Ar por captura de electrones con emisión de radiación gamma (11% de las veces). La actividad gamma, se puede medir de forma eficiente mediante espectrometría gamma, a través del detector de Germanio Hiperpuro (HPGe), el cual es de interés para determinar el contenido de potasio en aguacate (Loria *et al.*, 1992).

1.5. Normatividad nacional e internacional de contaminantes radiológicos en alimentos

El accidente ocurrido en Chernobyl en abril de 1986, puso de manifiesto la deficiencia en las normas existentes para hacer frente a las consecuencias de un accidente nuclear. Organizaciones internacionales como IAEA (Agencia Internacional de Energía Atómica) y FAO/WHO (Organización de Alimentos y Agricultura/ Organización Mundial de la Salud), se han encargado de desarrollar normas que faciliten la inspección de alimentos en caso de contaminación radiactiva. Se establecieron valores de referencia para los radionucleidos en el medio ambiente y en los alimentos, niveles encaminados a reducir o evitar posibles daños para la salud. Estos valores de referencia, son ajustados por los organismos nacionales correspondientes para establecer sus propios niveles (OMS, 1989).

A nivel nacional, la CNSNS (Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias) ha participado en el control radiológico de alimentos en colaboración con la Secretaría de Salud. Se elaboró la NOM-088-SSA1-1994 sobre Contaminación por radionúclidos en alimentos de consumo masivo importados, donde se establece la metodología a seguir para el análisis en alimentos y límites permisibles, pero fue cancelada y ya no se cuenta con otra regulación desde 2005.

El *Codex Alimentarius* estableció niveles de referencia y planes de muestreo relacionados con los contaminantes y las sustancias tóxicas naturales que se encuentran en los alimentos y piensos (CODEX STAN 193-1995), los cuales deben aplicarse a los productos que circulan en el comercio internacional.

Además de las tres principales organizaciones internacionales (FAO, WHO, IAEA), la Comisión Europea, la Agencia de Energía Nuclear de la Organización de Cooperación Económica y Desarrollo (NEA) y la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP),

juegan un papel importante en el desarrollo e implementación de estándares radiológicos en alimentos y agua potable. Euratom (Comunidad Europea de la Energía Atómica) definió niveles de intervención para radionucleidos de gran importancia para la contaminación de los alimentos; al igual que el *Codex Alimentarius*, cuando la presencia de un radioisótopo en un alimento, supera un nivel de intervención, el producto es considerado no apto para el consumo humano y no debe ser comercializado (Brandhoff, 2016). La Comisión Europea también estableció niveles de referencia para ciertos radioisótopos en algunos alimentos de la dieta básica, con el fin de proteger a la población y evitar dosis innecesarias por la ingesta de estos alimentos (Aguirre, 2003).

En la **Tabla 1.6**, se engloban los niveles recomendados (Bq/kg) que establecen diferentes organizaciones en alimentos para consumo general y alimentos para niños, leche y agua.

Tabla 1.6. Niveles recomendados de radionucleidos en alimentos

Organización	Radionucleidos	Niveles recomendados Bq/kg			
		Alimentos para consumo general	Alimentos para niños, leche y agua de bebida		
IAEA/CODEX	Cs-137, Cs-134, Ru-106, Ru-103, Sr-89	1000	1000		
	I-131	1000	100		
	Sr-90	100	100		
	Am-241, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242	10	1		
Reglamento EURATOM		Alimentos para lactantes	Productos lácteos	Otros alimentos	Productos líquidos
	Isótopos de Sr, principalmente Sr-90	75	125	750	125
	Isótopos de I, principalmente I-131	150	500	2000	500
	Isótopos emisores de plutonio y transplutónidos	1	20	80	20
	Resto de radionucleidos con vida media mayor a 10 días, Cs-137 y Cs-134	400	1000	1250	1000

En países como Canadá, la Agencia para la Inspección de Alimentos Canadienses (CFIA), después del terremoto en Japón en 2011, creó un programa para monitorear los niveles de radiación de productos importados, el cual consiste en un método llamado Concentración Mínima Detectable, donde se hace uso de la espectrometría gamma, que también se utiliza para este trabajo (Espinosa, 2013).

La Autoridad Europea de Seguridad en Alimentos (EFSA por sus siglas en inglés), utiliza los mismos métodos de detección, para garantizar la seguridad alimenticia en Europa (Espinosa, 2013).

Reino Unido, cuenta con más información e investigación detallada acerca de este tipo de contaminación. La Agencia de Estándares Alimenticios (FSA) tiene el programa de “Vigilancia Radioactiva”, donde se monitorea constantemente la contaminación radiológica, para garantizar la seguridad del consumidor. Esta información se publica entre uno o dos años en un “Reporte de Radioactividad en Alimentos y en el Ambiente”, el cual lleva a cabo los monitoreos y encuestas a partir de los acontecimientos ocurridos en Chernobyl desde el año de 1986.

Este reporte se encuentra dentro de los más completos a nivel mundial sobre contaminantes radiológicos, ya que cuenta con información acerca de los contaminantes encontrados, lugares donde se realizaron los muestreos, plantas nucleares que tienen en el país y su monitoreo, los establecimientos de defensa y acciones a realizar en caso de emergencia, incidentes fuera de su territorio, así como el monitoreo regional. Este documento podría ser una guía para realizar un análisis similar en el territorio nacional (como en la Central Nuclear de Laguna Verde en Veracruz y el Centro Nacional de Investigaciones Nucleares en el Estado de México), con la finalidad de tener mayor control en los alimentos que se cultivan en México, como medida preventiva en caso de cualquier tipo de accidente (Espinosa, 2013).

La FDA (Agencia de Alimentos y Medicamentos) establece la regulación de estos productos en la Guía de Niveles de Radionúclidos en Alimentos Importados, por lo que nuestro país se basa mayoritariamente en estos documentos, para desarrollar normas y metodologías para el territorio, aunque la FDA no posee mucha información en cuanto a contaminación radiactiva (FDA, 2005).

Capítulo 2

Aspectos fundamentales de Física de radiaciones

2.1. Antecedentes generales

No se tiene un concepto claro con respecto a las radiaciones, en general se les asocia a algo negativo. Han estado presentes en el espacio desde el comienzo del universo y el material radiactivo forma parte de la tierra desde su origen, mucho antes de que surgiese la vida (González y Rabin, 2011).

La radiactividad es omnipresente en la vida cotidiana. La vida se desarrolló en constantes radiaciones, se adaptó a ellas y se ha utilizado para diversificar y evolucionar en cada una de las especies que existen actualmente, incluso el ser humano es radiactivo, debido a la presencia de ciertos elementos. Por ejemplo, por medio de la alimentación, se asimila potasio-40, carbono-14 y tritio (López & Iturbe, 2004).

La mayor parte de la radiación recibida por la población mundial proviene de fuentes naturales siempre presentes en el medio ambiente (radiación cósmica y terrestre, alimentos, interna) y es inevitable estar expuesto a la mayoría de ellas. Pero en los últimos cien años aproximadamente, se han producido elementos radiactivos de manera artificial (tratamientos médicos, plantas nucleares) (González y Rabin, 2011).

La radiación se describe como la propagación de energía en forma de partículas u ondas, a través de un medio o espacio. Existen dos tipos: ionizante y no ionizante. La radiación ionizante tiene energía suficiente para liberar electrones de un átomo, dejando por tanto al átomo cargado, mientras que la radiación no ionizante no lo hace. En la **Figura 2.1**, se muestran la clasificación:

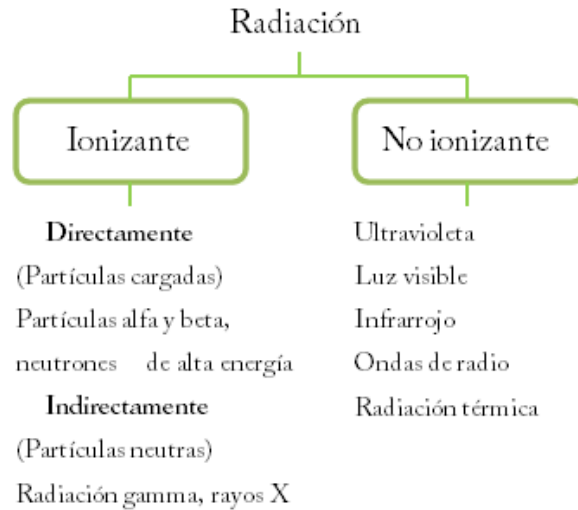


Figura 2.1. Clasificación de la radiación en dos categorías principales (IAEA, 2012).

2.2. Decaimiento radiactivo

El decaimiento o desintegración radiactiva, es la transformación espontánea de los núcleos atómicos inestables mediante la emisión de partículas cargadas y radiación electromagnética. Los núcleos excitados, se desexcitan mediante tres tipos de decaimiento: alfa, beta y gamma, modificando de esta forma el estado de sus núcleos hasta alcanzar el equilibrio energético. Si los productos de las desintegraciones, interaccionan con otro átomo o molécula y liberan un electrón, ocurre una ionización, lo que puede producir efectos biológicos sobre los seres vivos (Ciocci y Acuña, 2001).

Este fenómeno se le conoce como radiactividad natural y no depende de las influencias del entorno (presión, temperatura, reacciones químicas) y se ajusta a leyes estadísticas, donde cada núcleo posee una constante de decaimiento que se define como la probabilidad de que un núcleo se desintegre por unidad de tiempo.

La ley de decaimiento radiactivo está representada por la siguiente ecuación (Pinilla *et al.*, 2003):

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

N: Número de núcleos radiactivos al cabo de un tiempo t.

N₀: Número de núcleos radiactivos iniciales.

λ : Constante de decaimiento

t: Tiempo

Cuando los núcleos inestables se transforman en otros más estables se dice que decaen, por lo tanto, la cantidad de núcleos radiactivos disminuye con el tiempo de forma exponencial y es específico de cada elemento radiactivo.

2.3. Unidades

La antigua unidad de medida de la radiactividad era el Curie (Ci), el cual se definió como la actividad de 1 gramo de radio (elemento natural encontrado en la tierra), equivalente a 3.7×10^{10} Bq (Calzada y Cerecetto, 2019). En 1896, Becquerel descubrió la radiactividad, por lo que tradicionalmente la unidad de medida en el Sistema Internacional de Unidades fue el Becquerel (Bq) o desintegraciones por segundo (dps).

Una muestra radiactiva se caracteriza por su actividad, es decir el número de desintegraciones por segundo dentro de los núcleos radiactivos. El número de desintegraciones por segundo en un radioisótopo particular, es directamente proporcional a la cantidad de dicho isótopo que está presente.

Para alimentos y agua potable, las concentraciones de actividad de un radioisótopo se informan en unidades de becquerel por kilogramo o litro (Bq/kg o Bq/L).

En la **Tabla 2.1**, se muestran las unidades utilizadas con mayor frecuencia, para expresar la actividad de fuentes radiactivas (WHO, 2008).

Tabla 2.1. Unidades de actividad

Número de átomos transformados por segundo	Unidad: Becquerel (Bq)	Unidad: Curie (Ci)
1	1 Bq	27 picocurie (pCi)
1000	1 kilobecquerel (kBq)	27 nanocurie (nCi)
1×10^6	1 megabecquerel (MBq)	27 microcurie (μ Ci)
1×10^9	1 gigabecquerel (GBq)	27milicurie (mCi)
37	37 Bq	(nCi)
37,000	37 kBq	(μ Ci)
3.7×10^7	37 MBq	(mCi)
3.7×10^{10}	37 GBq	1 Ci

Para caracterizar las radiaciones ionizantes y el riesgo potencial de sus posibles efectos biológicos, se dispuso de un conjunto de magnitudes con sus correspondientes unidades. La Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación (ICRU), se encarga de la definición de magnitudes y unidades radiológicas, algunas de ellas se muestran en el **anexo A.1.**

2.4. Núclidos

Es una especie química con un número de protones (Z) y neutrones (N) específico, que se simboliza en forma general como A_ZX , donde X es el elemento químico en cuestión, A es el número másico (suma de protones y neutrones) y Z corresponde al número atómico.

En la Tabla 2.2, se representan los diferentes tipos de núclidos o nucleidos que existen:

Tabla 2.2. Características de diferentes tipos de nucleidos (Calzada y Cerecetto, 2019).

Nucleido	Características
Isótopos	Mismo número atómico y distinto número másico
Isómeros	Mismo número atómico y másico, pero distinto estado energético. *Se coloca la letra <i>m</i> en supraíndice que indica metaestable
Isótonos	Mismo número de neutrones
Isóbaros	Mismo número másico

2.5. Vida media

Es el tiempo que debe transcurrir para que los núcleos de una muestra radiactiva, se desintegren a la mitad de la cantidad inicial. Cada radioisótopo o radionucleido posee su propia constante de desintegración (λ), por lo tanto, la vida media ($t_{1/2}$) es una característica individual. La ecuación que la representa es la siguiente (Ortiz, 2012):

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

Son unidades de tiempo (s, h, d, a), puede tener valores desde millonésimas de segundo hasta el orden de miles de millones de años. Este período de tiempo no se ve afectado por la

temperatura, presión o especie química, por consiguiente, los átomos radiactivos no se pueden hacer inocuos mediante reacciones químicas, sino que conforme el paso del tiempo se va perdiendo reactividad, unos más rápido que otros (Calzada y Cerecetto, 2019).

2.6. Radioisótopos

En la naturaleza, la mayoría de los núcleos atómicos son estables y no se alteran en el tiempo; sin embargo, existen núcleos inestables que contienen un exceso de protones, neutrones o ambos, que se transforman espontáneamente, emitiendo radiación hasta alcanzar la estabilidad definitiva (López & Iturbe, 2004).

Los radioisótopos o radionúclidos presentes en el ambiente, se pueden agrupar de acuerdo a su origen en cuatro clases (Dinh *et al.*, 2011):

- *Radioisótopos primordiales:* Comprenden isótopos radiactivos presentes desde la formación de la Tierra; poseen vida media largas, por lo que no se han descompuesto. El miembro más destacado es el isótopo radiactivo de ^{40}K , que contribuye con aproximadamente 16% de la dosis anual recibida por la población, de radiación procedente de radioisótopos naturales.
- *Radioisótopos cosmogénicos:* Se producen en la atmósfera y por interacción de la radiación cósmica con la capa superior de la corteza terrestre; comprende isótopos de elementos que van desde hidrógeno (H) hasta criptón (Kr). Contribuyen con menos del 1% de la dosis efectiva anual de radioisótopos naturales, siendo el radiocarbono (^{14}C), el principal contribuyente.
- *Radioisótopos producidos en series de desintegración natural:* Son la fuente más importante de radiación ionizante en la Tierra, ya que contribuyen con aproximadamente 83% de la dosis media total efectiva recibida por la población, a partir de radioisótopos naturales. Se generan por desintegraciones nucleares sucesivas con emisión de partículas alfa o beta de tres radioisótopos primordiales: ^{232}Th , ^{235}U y ^{238}U , y terminan con isótopos estables de plomo (^{208}Pb , ^{207}Pb , ^{206}Pb). Los isótopos gaseosos de radón (^{219}Rn , ^{220}Rn , ^{222}Rn) y sus series de desintegración natural, son responsables del 50% de la dosis efectiva global recibida por la población mundial a partir de fuentes naturales de radiación ionizante.

- *Radioisótopos antropogénicos:* Se originan exclusivamente a partir de actividades del hombre; también están presentes en el ambiente y contribuyen a la dosis efectiva global recibida por la población mundial. Se produjeron o dispersaron en el medio ambiente durante las pruebas de la bomba nuclear, durante operaciones de rutina de instalaciones nucleares o se liberan en accidentes. Algunos de ellos son ^3H , ^{14}C , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr o isótopos de plutonio (^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu).

La estabilidad de un radioisótopo se ve influenciada por la proporción de protones y neutrones, por lo cual todos los núcleos con 84 protones o más, son inestables (Calzada y Cerecetto, 2019). Éstos sufren una desintegración radiactiva, liberando energía en tres formas de radiación principalmente: alfa, beta y gamma. En la **Tabla 2.3**, se muestran algunas características de los principales decaimientos.

Tabla 2.3. Características principales de los decaimientos alfa, beta y gamma (López & Iturbe, 2004).

Nombre	Carga	Masa (uma)	Velocidad relativa a la luz (%)	Alcance	Ionización relativa	Descripción
Partícula α	+2	4	5	Bajo (1.5cm/aire)	10, 000	Ion
Partícula β	± 1	0.0055	95	Medio (1.5m/aire)	100	Electrones
Radiación γ	0	0	100	Alto (km/aire)	1	Radiación electromagnética

La radiación puede adoptar la forma de partículas (α , β o neutrones) o de ondas electromagnéticas (gamma y rayos X), las cuales poseen diferente poder de penetración como se observa en la **Figura 2.2**, por lo que causan diversos efectos sobre la materia viva.

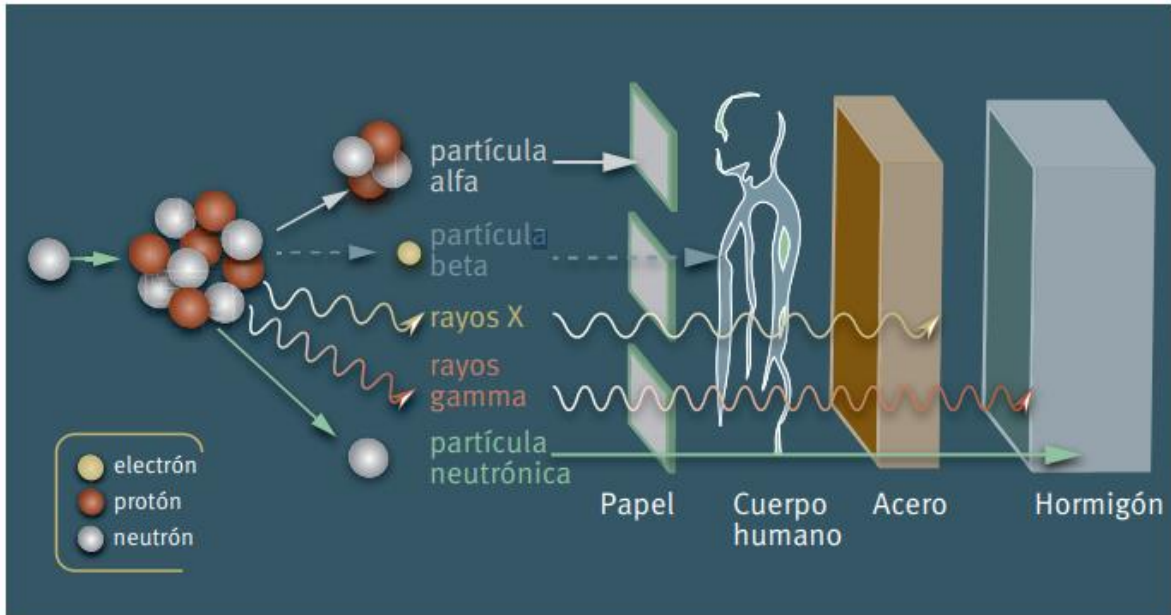
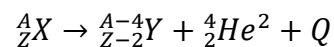


Figura 2.2. Poder de penetración de diferentes tipos de radiación (PNUMA, 2016).

Decaimiento α

Los núcleos pesados con número atómico 84, tienden a sufrir emisión α . Las partículas α son núcleos de helio, constituidos por dos protones y dos neutrones, por lo que un átomo que se desintegra con emisión α , pierde cuatro unidades de su número másico y dos de su número atómico (Ortiz, 2012).

La radiación alfa es usualmente energéticamente alta (energías entre 4-9 MeV), por lo que es altamente ionizante y son fácilmente absorbibles. Las partículas α tienen un alcance bajo en el aire (**Tabla 2.3**), y puede ser detenida por una simple hoja de papel (**Figura 2.2**), pues al tener mayor carga, pueden interactuar con átomos circundantes, reduciendo así la energía de la partícula y por lo tanto el poder de penetración. Este tipo de decaimiento se puede esquematizar de la siguiente manera (Calzada y Cerecetto, 2019):



Decaimiento β

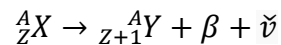
Los núcleos con alta proporción de neutrones y protones pueden alcanzar su estabilidad emitiendo una partícula beta. El decaimiento beta puede ser positivo o negativo (β^+ o β^-),

donde se reduce el número de neutrones y aumenta el número de protones en el núcleo (Calzada y Cerecetto, 2019).

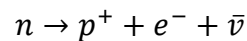
Las partículas β son más penetrantes que las partículas α , porque poseen menor carga, pueden atravesar 1-2 cm de tejido vivo (como se observa en la Figura 2.2) y puede ser detenida con una placa de vidrio o madera.

- *Decaimiento β^-*

Es la generación de electrones dentro del núcleo, que se lleva a cabo mediante la transformación de un neutrón del núcleo en un protón, más una partícula beta y una partícula sin carga de masa despreciable, llamada neutrino. Este electrón formado, posee mayor velocidad que los electrones del orbital (Ortiz, 2012). De forma general, el mecanismo se puede representar de la siguiente forma, donde ν es el antineutrino del electrón:

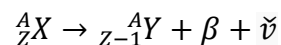


Lo que ocurre a nivel nuclear es:

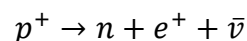


- *Decaimiento β^+*

En muchas reacciones nucleares se producen núcleos ricos en protones, que usualmente se desintegran por decaimiento β^+ . Este mecanismo consiste en la transformación de un protón en un neutrón y un electrón con carga positiva (positrón) emitido junto con un neutrino. El positrón es la partícula antimateria del electrón, es decir tiene su misma masa, pero carga de signo contrario (Calzada y Cerecetto, 2019). En esta desintegración, el número másico se conserva, al igual que el decaimiento β^- , pero el número atómico disminuye una unidad. Se puede esquematizar de acuerdo a lo siguiente:



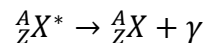
A nivel nuclear:



Decaimiento Gamma

Es un tipo de radiación electromagnética, similar a la luz o a las ondas de radio, que suele acompañar a procesos de decaimiento (alfa o beta), en la que el núcleo queda en un estado excitado. Este tipo de radiación puede recorrer cientos de metros en el aire y debido a su poder penetrante, se necesita de materiales de gran espesor como plomo o cemento para detenerla (**Figura 2.2**).

A partir de un estado nuclear excitado (estado metaestable), se produce una emisión gamma para que el núcleo vuelva a un estado estacionario. En la radiación gamma, no hay partículas con carga eléctrica y no existe variación del número másico ni del número atómico del núcleo que está emitiendo (Calzada y Cerecetto, 2019). Se puede representar como:



En la **Figura 2.3**, se ejemplifican los tres tipos diferentes de radiación (alfa, beta y gamma), tomando como referencia el núcleo de uranio-238 y el núcleo de fluor-18.

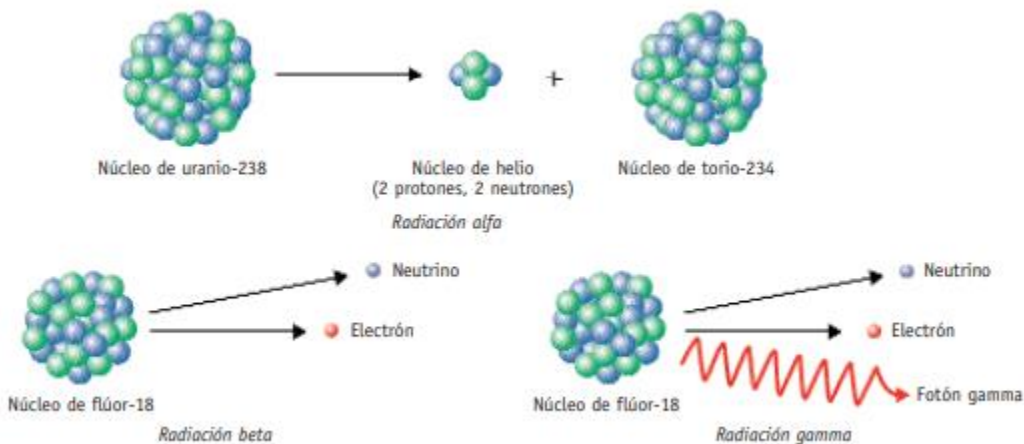


Figura 2.3. Esquema general de los diferentes tipos de radiación (López & Iturbe, 2004)

Las partículas alfa son capaces de causar más daño en las células que las partículas beta, cuando se ingiere o inhala un elemento radiactivo, debido a su masa y fuerte absorción; la radiación gamma, por su largo alcance, puede causar daño si el elemento radiactivo se encuentra fuera (por ejemplo, en el suelo) o dentro del cuerpo (VKM, 2017).

2.7. Interacción de la radiación electromagnética con la materia

La radiación gamma, son fotones de alta energía sin masa ni carga, que puede ser transmitida o atenuada (absorción o dispersión) por la materia. Este tipo de radiación, acompaña a la emisión de partículas alfa o beta, ya que los protones y neutrones del núcleo, aún no se encuentran en equilibrio, por lo tanto, el exceso de energía se libera a través de la radiación gamma (CEA, 2005).

La interacción de la radiación electromagnética con la materia, se da cuando los fotones ionizan la materia de forma indirecta, van perdiendo su energía mediante colisiones con electrones, los cuales ionizan la materia de forma directa, por lo que dicha interacción, puede ser detectada mediante tres principales mecanismos: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares. Estos mecanismos pueden causar efectos biológicos en los seres vivos.

Efecto fotoeléctrico

Se denomina a la emisión de electrones desde la superficie, por la acción de luz o de otras radiaciones electromagnéticas.

Cuando un fotón golpea un átomo, lo ioniza y a su vez expulsa un electrón de alta energía (fotoelectrón) por ende, la energía total del fotón disminuye al expulsar dicho electrón de la capa profunda que está fuertemente unido al átomo. La transferencia de energía se da en dos pasos: interacción fotón-electrón y depósito de la energía del fotoelectrón en la materia circundante (Sprawls, 1995).

La interacción crea un espacio en la capa de los electrones, que puede ser ocupado por un electrón orbital externo, dando lugar a la emisión de rayos X característicos. Este mecanismo predomina con radiación gamma de baja energía (por debajo de 0.1 meV) y la interacción dependerá del número atómico del material absorbente (Meroli, 2015).

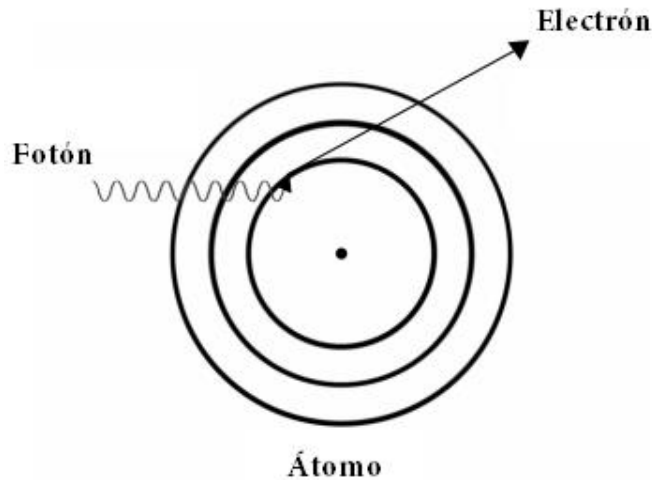


Figura 2.4. Efecto fotoeléctrico.

Imagen tomada de: https://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/3030/10/10_chapter%201.pdf

Efecto Compton

Se define como la difusión de un fotón, por interacción con un electrón libre o débilmente ligado, lo que conlleva a una pérdida de energía del fotón, la cual se cede al electrón.

Cuando la energía del fotón es mayor que la energía de unión de los electrones (fotones de energía media 0.3-3 MeV), se dice que los electrones son libres, generalmente se encuentran en la capa externa. En este mecanismo, el fotón pierde solo una fracción de su energía, por lo tanto, el electrón libre (electrón de Compton) se dispersa junto con un fotón de menor energía que el inicial (Meroli, 2015).

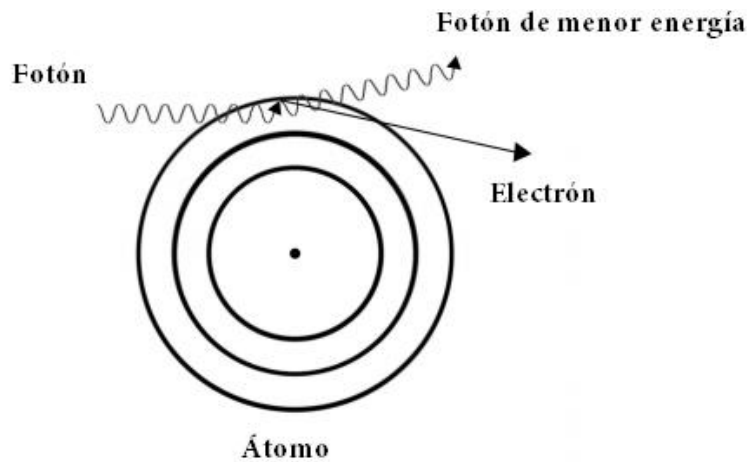


Figura 2.5. Efecto Compton

Imagen tomada de: https://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/3030/10/10_chapter%201.pdf

Producción de pares

Es una interacción fotón-materia que ocurre con fotones de energías superiores a 1.02 MeV. Este mecanismo se da cuando un fotón de radiación gamma de alta energía, pasa lo suficientemente cerca de un núcleo, el fotón se absorbe completamente en la materia y se forma un electrón y un positrón (Abdulwahab, 2016).

Estas dos partículas tienen la misma masa, equivalente a una energía de masa en reposo de 0.51 MeV. Los positrones se aniquilan al combinarse con electrones en el medio de interacción.

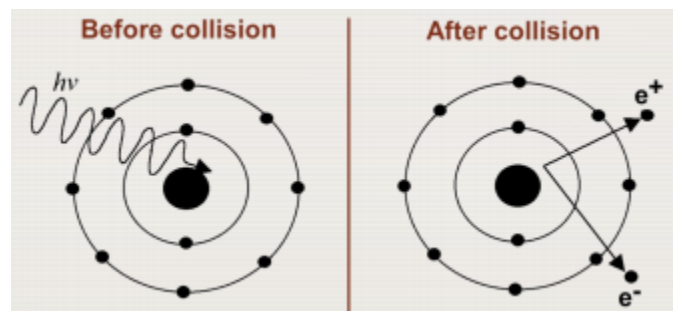


Figura 2.6. Producción de pares (IAEA, 2012).

2.8. Fuentes naturales y artificiales de radiación ionizante

Fuentes de radiación natural

Las radiaciones ionizantes de origen natural, han estado presentes desde la creación de la Tierra (elementos radiactivos tienen vida media de cientos de millones de años), provenientes tanto del espacio exterior (rayos cósmicos), como del material radiactivo de la propia corteza y núcleo, de los cuales, algunos se encuentran incorporados a materiales de construcción, al aire y alimentos, incluso hay sustancias radiactivas en el cuerpo humano.

Los materiales radiactivos de origen natural (NORM, por sus siglas en inglés), provienen de las series de desintegración natural de uranio-238, uranio-235 y torio-232. Estos elementos, emiten diferentes radiaciones ionizantes en el medio ambiente, por lo que las personas generalmente reciben una dosis total de radiación de 0.3 mSv al año (IAEA-TECDOC, 2016).

La radiación natural no es dañina, sino indispensable para la vida. Se le conoce como radiación de fondo y forma parte del medio ambiente, ésta puede variar dependiendo de

factores como: altura sobre el nivel del mar, tipo de suelo, actividad del hombre (UNSCEAR, 2000).

Las fuentes naturales de radiación son las siguientes (PNUMA, 2016):

- *Radiación cósmica*: Son partículas de alta energía emitidas por estrellas, el sol y otros cuerpos del espacio. El sol produce neutrinos, partículas de alta energía que atraviesan el cuerpo humano cada segundo. La atmósfera y el campo magnético desvían la radiación cósmica hacia los polos, asimismo el nivel de altura aumenta la exposición.
- *Radiación terrestre*: En la Tierra, existen radionucleidos primigenios que se encuentran en el suelo: torio-232, uranio-235 y uranio-238, con tiempos de vida media largos.
- *Radón*: Es un radioisótopo en forma de gas, producto del decaimiento de Uranio-238 presente en rocas y suelo. Se dispersa en la atmósfera y se difunde en rocas volcánicas, graníticas y materiales de construcción. El radón tiene un tiempo de vida corta, por lo que los productos que se generan en su decaimiento (polonio-218 y 214), se pueden retener en pulmones, por eso es esencial mantener una buena ventilación en los hogares.
- *Alimentos*: Los radionúclidos tanto naturales como artificiales presentes en suelo, rocas y agua pueden transferirse a las plantas, y de éstos a los animales. Por ejemplo: potasio-40, carbono-14, tritio.
- *Radiación interna*: se produce en los seres humanos como potasio-40, carbono-14.

Fuentes de radiación artificial

La radiación artificial resulta de actividades humanas, especialmente de tratamientos médicos (por ejemplo, diagnóstico con rayos X, aplicación de radionucleidos en medicina), producción de energía eléctrica, industria, investigación, pruebas con explosiones nucleares en la atmósfera, accidentes nucleares (Chernobyl, Fukushima-Daiichi), entre otras. Este tipo de radiación, incrementa la dosis a la que está sometida naturalmente la población (UNSCEAR, 2000).

2.8.1. Cadenas de decaimiento radiactivo de radiación natural

Las cadenas naturales contienen elementos radiactivos acumulados durante millones de años. Una de las principales características de las cadenas naturales de decaimiento, es que comienzan con un radionúclido de vida media larga como para que sobrevivan cantidades significativas desde que se crearon los elementos en la corteza terrestre, lo que conduce a componentes intermedios (isótopos hijo) con vidas medias más cortas, hasta llegar a su estabilidad. Los pasos predominantes en las cadenas son los decaimientos alfa (disminuyen cuatro unidades el número másico) y beta (no hay cambios).

En la naturaleza, existen cuatro series radiactivas naturales que se muestran en la **Tabla 2.4** y son: Torio-232, Neptunio-237, Uranio-235 y Uranio-238, que están encabezadas por un radionúclido con un periodo de semidesintegración del mismo orden de magnitud que la edad de la Tierra. Cada uno de estos radionúclidos comienza a desintegrarse y termina con un isótopo de plomo estable. En la serie del neptunio, el último componente estable de la serie radiactiva es $^{209}_{83}\text{Bi}$, es el único que permanece en la Tierra en cantidades significativas.

Tabla 2.4. Características de las cadenas naturales radiactivas en la corteza terrestre
(Vasilyeva y Starkov, 2001).

Cadenas	Cambio de masa	Isótopo padre radiactivo	Vida media (años)	Isótopo hijo estable
Torio	4n	^{232}Th	1.405×10^{10}	^{208}Pb
Neptunio	4n+1	^{237}Np	2.14×10^6	^{209}Bi
Uranio	4n+2	^{238}U	4.47×10^9	^{206}Pb
Uranio-actinio	4n+3	^{235}U	7.04×10^8	^{207}Pb

Cadena de decaimiento natural de Uranio-238

El uranio natural está formado por tres tipos de isótopos: uranio-238 (abundancia isotópica: 99.285%), uranio-235 (0.71%) y uranio-234 (0.005%) (Sánchez, 2005).

El ^{238}U se descompone a ^{234}Th , emitiendo una partícula alfa, el núclido formado también es inestable, y éste se descompone en 14 núclidos más, 8 producidos por emisión de partículas alfa y 6 por emisión de partículas beta, acompañadas de radiación gamma hasta la formación de plomo estable. Esta serie se encuentra en equilibrio, ya que todos los núclidos hijos, tienen una vida media más corta que el núclido primario ^{238}U .

Esta serie de desintegración incluye a radio-226 que tiene una vida media de 1,600 años, éste decae en radón-222, que es un gas noble inerte. Este radionúclido puede escapar a la atmósfera y depositarse en el aire, la radiación emitida en la desintegración de radón-222 puede causar daño a los pulmones (Singh, 2011).

En la **Figura 2.7**, se muestra la cadena de decaimiento natural de Uranio-238, donde se indica número atómico, tiempo de vida media y tipo de desintegración de cada radionúclido.

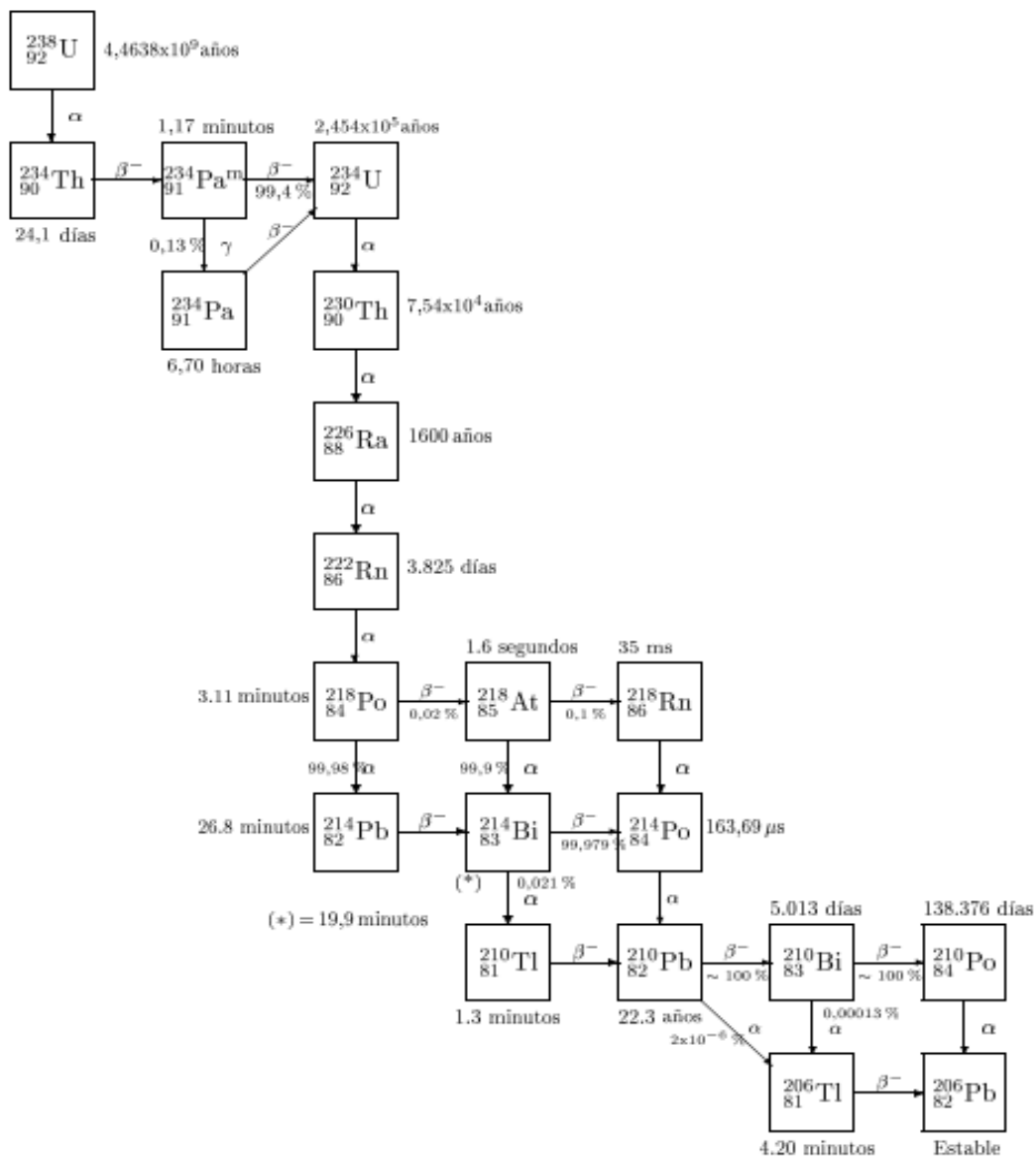


Figura 2.7. Cadena de decaimiento de Uranio-238

Imagen tomada de:

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98290/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cadena de decaimiento natural del Uranio-235

La cadena de uranio-actinio, inicia con Uranio-235, que comprende 0.72% del uranio natural, la serie de desintegración comprende 12 núclidos en 11 etapas de descomposición y la emisión de 7 partículas alfa como se muestra en la **Figura 2.8**.

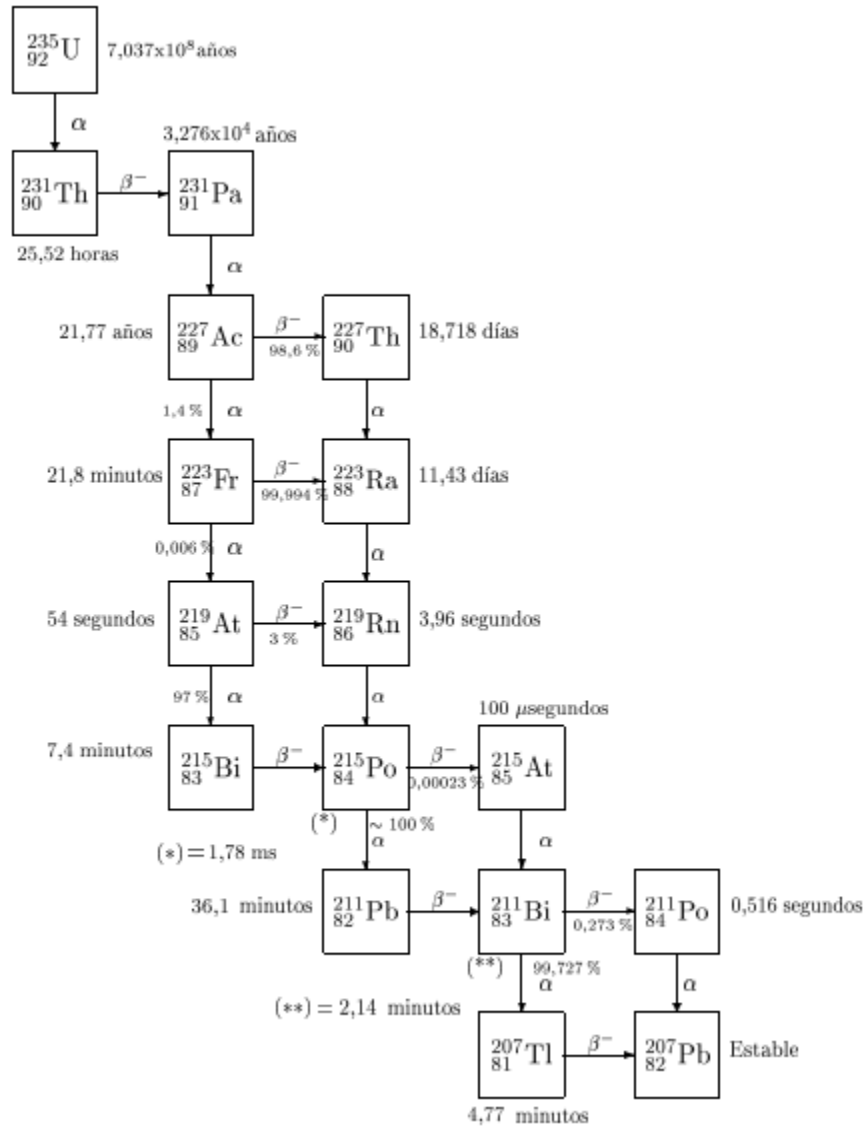


Figura 2.8. Cadena de decaimiento de Uranio-235

Imagen tomada de:

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98290/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cadena de decaimiento natural del Torio-232

El torio natural es 100% ^{232}Th , es el radionúclido padre de una serie radiactiva que se muestra en la **Figura 2.9**; se producen 6 partículas alfa durante 10 etapas de descomposición, 4 emisoras beta y un emisor alfa-beta, que es ^{212}Bi , el cual puede producir ^{208}Tl por decaimiento alfa, y ^{212}Po por decaimiento beta (Singh, 2011).

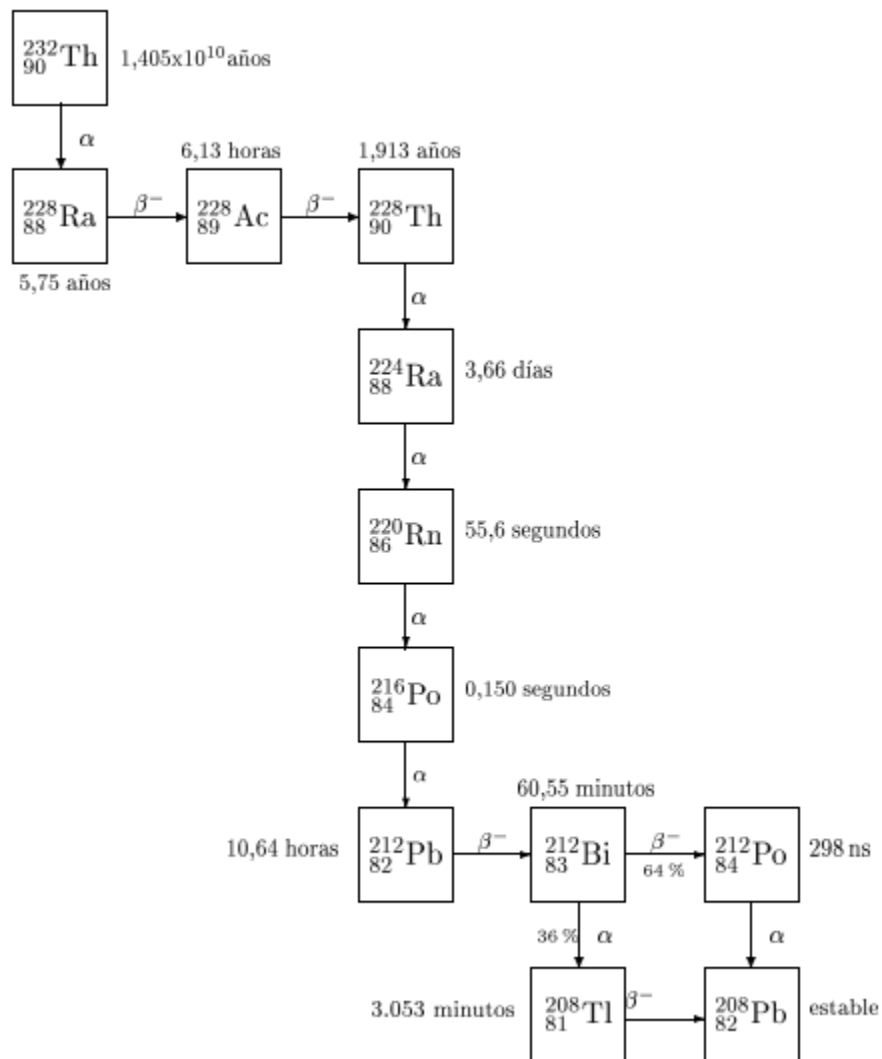


Figura 2.9. Cadena de decaimiento de Torio-232

Imagen tomada de:

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98290/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

2.9. Contaminación de alimentos por elementos radiactivos

Los acontecimientos más importantes que causaron la introducción de radioisótopos en el medio ambiente fueron: las pruebas de bombas atómicas en tierra (1950-1960), el accidente nuclear en Chernobyl (1960) y Fukushima (2011). Después de estos incidentes, organizaciones internacionales se encargaron de realizar investigaciones sobre los elementos radiactivos que pudieran ser significativos en la cadena alimentaria, para provocar un riesgo en la salud de la población y con ello, interrumpir el mercado internacional de alimentos. El rango de dosis individuales de la ingestión de radioisótopos de origen natural es de 0.2-1 mSv en un año, por lo que no es posible controlar la exposición de la población a esta fuente, basado en la Norma General del *Codex* (IAEA-TECDOC, 2016).

Los materiales radiactivos se encuentran en el medio ambiente, en el cuerpo humano y en los alimentos. Se han utilizado para estudios de eficacia de fertilizantes, absorción por plantas, nivel de biodegradación de insecticidas, entre otros. La presencia de radioisótopos en alimentos, dependen de varios factores como: contaminación natural, propiedades químicas de los elementos que afectan la absorción, la química y abundancia de nutrientes del suelo y agua, y la dieta específica de la especie. Los más comunes son: potasio-40, radio-226 y productos de la desintegración de uranio y torio.

- Origen natural

La Norma General del *Codex*, señala que los radioisótopos de origen natural están presentes en todos los productos alimenticios en diversas concentraciones, de acuerdo a las condiciones ambientales, prácticas agrícolas y otros factores que afectan la transferencia del medio ambiente a cultivos y productos animales. Las dosis de radiación derivadas del consumo de alimentos oscilan entre decenas y cientos de microsieverts en un año, por lo tanto, la dosis recibida de estos elementos en la dieta, es incontrolable (IAEA-TECDOC,2016)

La UNSCEAR, proporcionó datos científicos disponibles en la **Tabla 2.5**, sobre las dosis de ingestión de radionucleidos de origen natural en alimentos y agua para consumo humano.

Tabla 2.5. Valores de referencia de concentraciones de radionucleidos de las series de Uranio y Torio presentes en alimentos y agua (IAEA-TECDOC,2016)

Producto	Concentración (Bq/kg) x 10 ⁻³								
	²³⁸ U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³² Th	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	²³⁵ U
Leche	1	0.5	5	15	15	0.3	5	0.3	0.05
Carne	2	2	15	80	60	1	10	1	0.05
Cereales	20	10	80	50	60	3	60	3	1
Vegetales de hoja	20	20	50	80	100	15	40	15	1
Raíces y fruta	3	0.5	30	30	40	0.5	20	0.5	0.1
Pescado	30	10	100	200	2 000	10	ND*	100	ND*
Agua potable	1	0.1	0.5	10	5	0.05	0.5	0.05	0.04

ND: No se dispone de datos publicados

A partir de estos datos, plantearon que las dosis individuales anuales de radionúclidos de las series de uranio y torio en la dieta total (alimentos y agua potable) son 0.26 mSv, 0.2 mSv y 0.11 mSv para bebés, niños y adultos, respectivamente, con un valor ponderado valor medio de 0,14 mSv.

El potasio-40 es la fuente más importante que se encuentra en el ambiente y que se ha incorporado en el organismo, debido a que se encuentra presente en los alimentos y en el agua (CSN, 2010).

- Origen artificial

Los niveles de referencia del *Codex*, se muestran en la **Tabla 2.6**, se han desarrollado para 20 radioisótopos artificiales divididos en cuatro grupos de acuerdo a su radiotoxicidad. Se consideran dos categorías: alimentos para lactantes y alimentos distintos de los alimentos para lactantes. Éstos valores aplican a los radionucleidos presentes en alimentos destinados al consumo humano y comercializados internacionalmente. Se muestran los radionucleidos más importantes por su captación en la cadena de alimentos, si estos se encuentran en

niveles que no superan los límites de referencia correspondientes, el alimento debe considerarse seguro para el consumo humano, en lo que respecta a la protección radiológica (INFOSAN, 2011).

Tabla 2.6. Niveles de referencia de Radionucleidos artificiales en alimentos (IAEA-TECDOC, 2016)

Producto	Radionúclidos representativos	Nivel de referencia (Bq/kg)
Alimento infantil*	^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am	1
	^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{129}I , ^{131}I , ^{235}U	100
	$^{35}\text{S}^{**}$, ^{60}Co , ^{89}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{192}Ir	1 000
	$^3\text{H}^{***}$, ^{14}C , ^{99}Tc	1 000
Otros alimentos	^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am	10
	^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{129}I , ^{131}I , ^{235}U	100
	$^{35}\text{S}^{**}$, ^{60}Co , ^{89}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{192}Ir	1 000
	$^3\text{H}^{***}$, ^{14}C , ^{99}Tc	10 000

*Cuando esté destinado a ser utilizado como tal, **Representa el valor del azufre ligado orgánicamente, ***Representa el valor del tritio ligado orgánicamente.

Los radionúclidos artificiales de mayor importancia debido a su posible transferencia a los alimentos, se muestran en la Tabla 2.7:

Tabla 2.7. Radionúclidos más importantes que pueden estar presentes en distintos tipos de alimentos (IAEA, 1989).

Alimento	Radionúclidos	Vía de contaminación
Agua	^3H , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs	El agua potable y la de consumo son una fuente de contaminación, ya sea de forma directa o mediante el uso en la preparación y procesamiento de alimentos.
Leche	^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs	Puede ocurrir por inhalación o ingestión de radionucleidos en agua potable y piensos contaminados.
Carne	^{134}Cs , ^{137}Cs	Resultado del pastoreo de animales o de agua potable contaminada.
Otros	^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs	El suelo contaminado, sirve como fuente directa de radionucleidos, que conducen a la contaminación de todos los productos agrícolas, como la cosecha de verduras. La hierba es una fuente de radionucleidos, ya que puede pasar de los animales y luego al hombre, a través de la carne o leche.
Vegetación	^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce	Los vegetales de hoja verde, son más propensos a la contaminación externa de radionucleidos de corta duración durante su fase de crecimiento (absorción en la raíz).

2.9.1. Efectos en la salud

UNSCEAR estima que la dosis efectiva anual promedio de radiación para un individuo es de aproximadamente 3 mSv; de este valor, el 0.62 mSv son de fuentes artificiales y el 2.4 mSv corresponde a la exposición de fuentes naturales, que puede provenir de sustancias radiactivas en el aire, los alimentos y el agua (PNUMA, 2016).

De los alimentos, se estima que la dosis recibida por una persona en el curso de 1 año es de 0.29 mSv, de los cuales 0.17 se deben al potasio-40 (CSN, 2010).

El consumo de alimentos contaminados aumentará la cantidad de radiactividad dentro de una persona, es decir aumentará la exposición a la radiación, por lo que puede considerarse como un riesgo para la salud humana. Cuando un individuo ingiere un alimento contaminado, el elemento radiactivo se absorbe y se incorpora al organismo, pudiendo interactuar con moléculas intracelulares (incluido el DNA).

Los radioisótopos ingeridos, pueden acumularse en huesos y órganos específicos dentro del organismo, donde ejercen efectos tóxicos. Los tejidos más radiosensibles son los formadores de células sanguíneas, las gónadas y los pulmones. Los menos radiosensibles son el tejido nervioso y muscular.

Algunos elementos radiactivos, atraviesan la pared intestinal, por ejemplo, yodo y cesio (100% pasa la pared intestinal); el 66% del uranio ingerido, se elimina rápidamente por la orina, lo demás se distribuye y almacena en los riñones (12-25%), huesos (10-15%) y tejidos blandos. El radio (Ra), se deposita generalmente en los huesos y el gas radón se difunde en la pared del estómago (Darko *et al.*, 2015).

Los efectos biológicos dependerán del tipo y cantidad de radioisótopo que se ha ingerido. Cada radionúclido actúa de acuerdo a su vida media, periodo biológico, propiedades químicas y naturaleza de las partículas emitidas. Los isótopos radiactivos con vida media larga, pueden penetrar en los seres humanos, a través de la cadena alimentaria y aumentar la carga de radiación durante muchos años, por ejemplo, cesio-137 (vida media de 30 años), es análogo a potasio, por lo que se distribuye de manera uniforme en tejidos blandos del cuerpo y se elimina entre 50-150 días (periodo biológico); el tritio (vida media 12.3 años) se puede alojar

en todo el cuerpo (López & Iturbe, 2004). El yodo radiactivo, tiene una vida media relativamente corta (8 días), pero si se inhala o ingiere, se concentrará en la glándula tiroides, con lo cual aumentará el riesgo de cáncer de tiroides.

En cuanto a la cantidad ingerida de radioisótopos, con una dosis elevada, las degradaciones moleculares (modificaciones químicas del DNA y mutación celular) pueden provocar la muerte celular. Cuando la dosis es baja, la mortalidad es diferida.

Las principales características de los radioisótopos utilizados en la evaluación de riesgos en alimentos, se muestran en la Tabla 2.8:

Tabla 2.8. Principales características de los elementos radiactivos en alimentos
(VKM, 2017)

Elemento radiactivo	Vida media	Origen	Tipo de radiación	Características relevantes y presencia actual en alimentos
Elementos radiactivos naturales				
Carbono-14	5,730 años	Cosmogénico (y una pequeña fracción antropogénico)	Beta	Constituye una fracción específica de todo el carbono, el cual está presente en todo tipo de alimentos y se ha demostrado que la dosis es relativamente consistente independientemente de la dieta. Presente en todas partes del cuerpo.
Plomo-210	22 años	Uranio-238 en la corteza terrestre	Beta y gamma	El gas radón en la atmósfera se descompone en plomo-210, que se une a las partículas y es depositado en superficies, incluida la vegetación. Se acumula principalmente en los huesos, pero también en tejidos blandos como hígado y riñón. Más altas concentraciones, encontradas en mariscos y alimentos de tierra (como setas)
Polonio-210	138 días	Uranio-238 en la corteza terrestre	Alfa	Producto de descomposición de plomo-210. Se acumula en hígado y riñón, pero también está presente en músculo. Encontrado en mariscos y setas, en concentraciones más altas.
Potasio-40	1.3 billones de años	En la corteza terrestre (primordial)	Beta	Constituye una fracción específica de todo el potasio, (incluido potasio-40). Está homeostáticamente regulado en el cuerpo, y cualquier exceso será excretado. Por lo tanto, el consumo no afecta la dosis ingerida. El potasio es el elemento más abundante dentro de las células (como ion libre), particularmente en tejidos fisiológicamente activos (por ejemplo, el músculo)
<i>Continúa tabla 2.8</i>				

Elemento radiactivo	Vida media	Origen	Tipo de radiación	Características relevantes y presencia actual en alimentos
Radio-226	1,600 años	Uranio-238 en la corteza terrestre	Alfa	Las concentraciones más altas son generalmente encontradas en mariscos. Se absorbe y se distribuye en sistemas biológicos de manera similar al calcio, se acumula en huesos.
Radio-228	5.8 años	Torio-232 en la corteza terrestre	Beta	
Radón-222	3.8 días	Uranio-238 en la corteza terrestre	Alfa	Es un gas noble que puede emanar de rocas/suelos a la atmósfera o agua. Producto de desintegración del radio-226. Sólo es relevante para agua potable. Pozos perforados en roca son particularmente vulnerables, dependiendo de la geología y química del agua. Si el agua se almacena o es calentada, el gas radón escapa.
Elementos radiactivos antropogénicos				
Cesio-137	30 años	En Noruega, principalmente en el accidente de Chernobyl	Beta y gamma	Se absorbe y distribuye en sistemas biológicos similares al potasio, pero está disponible en trazas en comparación al potasio y no es afectado por la regulación del potasio. En humanos y animales, el cesio se encuentra en concentraciones más altas en tejidos blandos fisiológicamente activos. Al igual que potasio, el cesio se transfiere a la leche; las concentraciones más altas se encuentran en productos de tierras baldías, incluidas setas, ovejas, renos.
Yodo-131	8 días	Emergencia nuclear	Beta y gamma	El yodo es un elemento volátil que se libera con relativa facilidad durante emergencias nucleares. Es un elemento imprescindible (utilizado en la producción de hormonas tiroideas); el yodo radiactivo en algunas formas químicas, se ingiere por humanos y animales, y se concentra en la glándula tiroides. En animales lactantes, el yodo se excreta en leche y la contaminación de la leche es, por tanto, el principal riesgo, además de la contaminación de verduras frescas. Yodo-131 tiene una vida media física corta, pero la dosis de radiación se concentrará en la tiroides durante las primeras semanas después de una emergencia nuclear. Los alimentos con mayor probabilidad de tener altas concentraciones son la leche y las verduras de hoja.
<i>Continúa tabla 2.8</i>				

Elemento radiactivo	Vida media	Origen	Tipo de radiación	Características relevantes y presencia actual en alimentos
Plutonio-239	24,110 años	Emergencia nuclear	Alfa	El plutonio es absorbido por el intestino en un grado muy limitado, y la gran mayoría se excreta. La pequeña fracción que se absorbe, se acumula en los huesos e hígado. Productos derivados de animales, no se espere que presenten problemas. Los alimentos más ricos en concentraciones altas son vegetales de hoja.
Estroncio-90	29 años	Emergencia nuclear	Beta	Es un metal alcalinotérreo, como el calcio, y se comporta de manera similar en el medio ambiente y en los sistemas biológicos. Se libera con menor facilidad durante los accidentes nucleares y generalmente no se transfiere a productos alimenticios tan fácilmente como el cesio. Los alimentos con mayor probabilidad de alcanzar altas concentraciones son la leche y las verduras de hoja.

2.10. Métodos de medición de contenido radiológico

El tipo de método aplicable para el análisis de radionúclidos, depende de la radiación emitida (alfa, beta o gamma). De forma general, existen dos métodos: químico y nuclear. En el método químico, el elemento de interés es separado de otros elementos y de la matriz de la muestra, usando técnicas radioquímicas. Estos procedimientos pueden involucrar precipitación, intercambio de iones, destilación o extracción por solventes. El método nuclear consiste principalmente, en el análisis por espectrometría gamma de uno o varios radionúclidos que pudieran encontrarse en algunos alimentos, se puede aplicar a mezclas complejas de radionúclidos, donde la radioquímica ya no es necesaria (Loría *et al.*, 1992).

Los instrumentos para medir la radiactividad, utilizan las propiedades ionizantes de la radiación, ya que proporcionan un medio con el que la radiación puede interactuar y un medio para identificar dicha interacción. Todos los instrumentos pueden clasificarse en tres categorías, de acuerdo a su medio de interacción: detectores de ionización de gas, detectores de centelleo o fósforo y detectores de estado sólido.

En la Tabla 2.9, se describen los instrumentos mencionados (Baratta, 1994):

Tabla 2.9. Características generales de instrumentos para medir radiactividad.

Tipo de detector	Características generales
Ionización de gas	Contienen un volumen cerrado de gas en el que se colocan dos electrodos, donde se mide la ionización producida por la radiación cuando atraviesa el gas. La ionización genera cargas que son atraídas hacia los electrodos, generándose una corriente que puede ser medida.
De centelleo o fósforo	Utilizan la capacidad de las radiaciones ionizantes para producir destellos de luz (centelleos) en fósforo. Los destellos de luz, pueden producir fotoelectrones que se amplifican en un pulso que puede ser contado.
De estado sólido	Aprovechan la propiedad de algunos aislantes (como cristales de cloruro de plata) o de semiconductores (como germanio o silicio), para mostrar una conductividad instantánea, cuando las partículas de alta energía o la radiación, interactúan con el material que compone el detector.

Una de las ventajas de los detectores de estado sólido es que, presentan mayor densidad que los líquidos o gaseosos, lo que permite reducir el tamaño del volumen activo; en comparación con los detectores de centelleo, los detectores sólidos tienen mejor resolución y eficiencia. Al emplear materiales semiconductores, se obtiene una respuesta rápida y lineal, además de presentar versatilidad geométrica (Baratta, 1994).

Varias autoridades internacionales como la FDA en Estados Unidos, llevan a cabo un monitoreo del suministro de alimentos, mediante la determinación de radionúclidos emisores de radiación gamma, por espectrometría de Germanio de alta pureza (detector de estado sólido). Con esta técnica es factible medir la actividad específica de radionucleidos, sin necesidad de separar los isótopos de la matriz original, es por esta razón que se eligió este método para el estudio de este proyecto (INFOSAN, 2011).

2.10.1 Espectrometría gamma

Es el método recomendado por IAEA, que permite la identificación cualitativa y determinación cuantitativa de los radionucleidos emisores gamma presentes en una muestra. Consiste en capturar parte o toda la energía liberada, a través del decaimiento de isótopos radiactivos, y convertirlo posteriormente en un flujo de corriente o pulso que se pueda registrar.

La detección de emisores gamma, se basa en la interacción de la radiación gamma con la materia (efecto fotoeléctrico, Compton y producción de pares), originándose un pulso eléctrico de voltaje proporcional a la energía entregada por el fotón incidente.

Para el análisis espectral, se utiliza un analizador de altura de pulso o multicanal, que es acoplado a un sistema informático con software automatizado, para realizar los cálculos a altas velocidades, donde los pulsos eléctricos se clasifican por energía y número de pulsos contados (el recuento se puede hacer sumando los pulsos registrados) en cada banda de energía que se almacena por separado (canal), obteniéndose el espectro de energía de la muestra (Baratta, 1994).

La ventaja de este método de detección, es la capacidad que tiene de medir emisores gamma directamente en la muestra original sin la necesidad de una preparación previa, por lo que es una técnica no destructiva, que permite el análisis simultáneo de múltiples elementos en una muestra.

2.10.2. Detector de Germanio Hiperpuro (HPGe)

El detector es el elemento fundamental del sistema de detección, ya que capta la radiación y funge como medio ionizable. Es un detector de estado sólido hecho de materiales semiconductores (estructuras cristalinas de Germanio). Se basa en el depósito de energía de la radiación en un semiconductor, esta energía ioniza la red cristalina produciendo conducción (pulsos eléctricos) temporalmente en el semiconductor (Aguilera *et al.*, 2001).

Este equipo detecta la radiación gamma a través del efecto fotoeléctrico; el fotoelectrón es acelerado por el campo eléctrico aplicado al cristal, el cual produce un impulso en el que es proporcional a la energía de la radiación gamma original.

Cada componente electrónico del sistema HPGe, tiene una fuente de alimentación separada necesaria. Los detectores son compactos y requieren ser enfriados a temperaturas criogénicas, para reducir la generación de portadores de carga térmica (ruido) a un nivel aceptable. El medio más común para el enfriamiento, es utilizar nitrógeno líquido (-200°C).

Una de las desventajas de este tipo de detectores, es que son más costosos y presenta dificultades en su manejo, ya que requiere condiciones de nitrógeno líquido constante y son sensibles a condiciones ambientales de laboratorio.

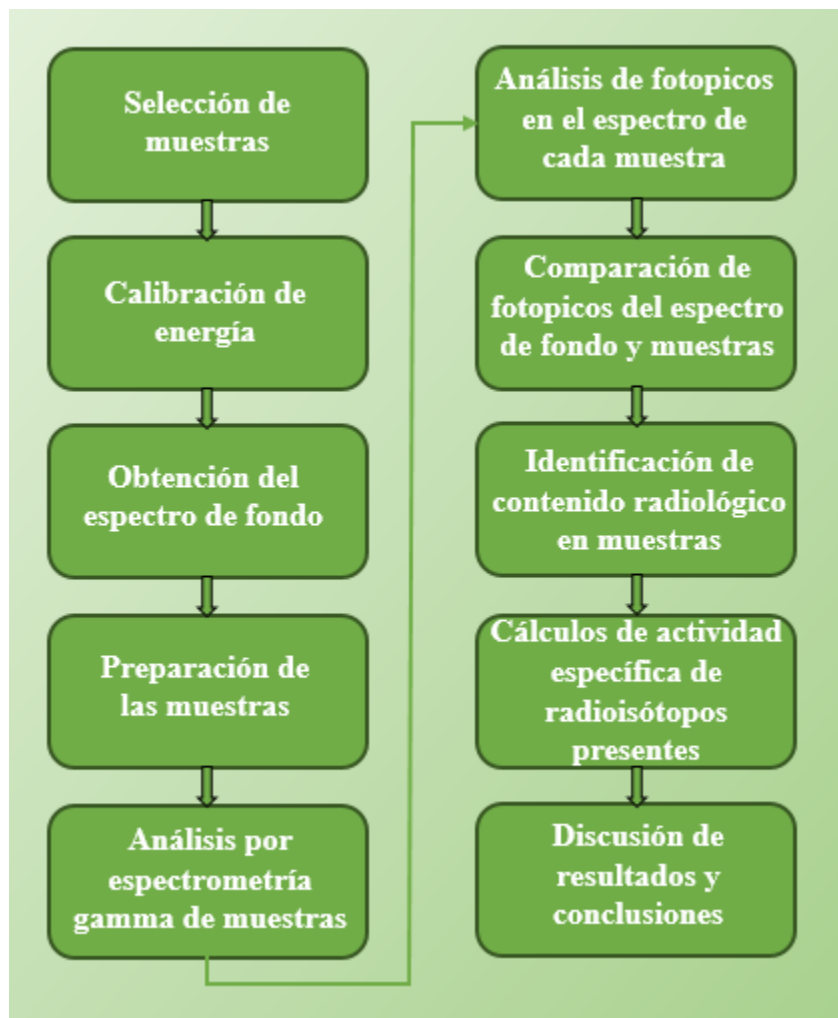
Su principal ventaja es el poder de resolución, ya que tiene la capacidad de diferenciar radiaciones de energías muy próximas, por ejemplo, muestras naturales originan productos de desintegración del uranio y torio con múltiples energías. La muestra puede ser analizada directamente para radionúclidos emisores gamma, consiguiendo límites de detección bajos.

Capítulo 3

Metodología

El procedimiento experimental para realizar el análisis de este estudio, se engloba en la **Figura 3.1**. Se muestra un esquema general de los pasos a seguir, con el fin de disminuir las variaciones que pudieran aportar incertidumbre a los datos obtenidos durante el trabajo experimental.

Figura 3.1. Diagrama de bloques del procedimiento experimental



3.1. Selección de muestras

Las muestras seleccionadas, se eligieron con base a distintos factores: producción, consumo, importancia comercial, así como lugar de origen.

Se seleccionó el aguacate por su producción constante y su importancia comercial, ya que es la cuarta fruta tropical más importante a nivel mundial, pues se estima una producción global de 2.6 millones de toneladas, siendo México el mayor productor y consumidor del mundo. Por su elevado valor nutritivo, se ubica entre las frutas más completas, convirtiéndose en una alternativa para contrarrestar problemas de nutrición (Rubí *et al.*, 2013).

Para la selección se tomó en cuenta la facilidad de obtención de las muestras, ya que a pesar de que el aguacate se cosecha durante todo el año, no todas las variedades se encuentran disponibles en el mercado, por eso se analizaron tres variedades de aguacate: *Hass*, *Criollo* y *Pagua*.

Aguacate Hass: Existe una preferencia por el consumo de la variedad Hass por su calidad y sabor, debido a que el aprovechamiento de la pulpa se da entre 66-70%. Los frutos analizados tienen de 8 a 10 cm de largo, un peso entre 150-400 g y tienen forma ovoide; la cáscara es mediana a gruesa, de textura rugosa y de color morada a negra; la pulpa es cremosa de color amarillo-verde. El fruto presenta una relación en porcentaje de cáscara: semilla: pulpa de 8.5: 11.5: 80. En la **Figura 3.2**, se muestra el aguacate Hass proveniente de Michoacán.



Figura 3.2. Aguacate Hass de Michoacán utilizado para este trabajo. Imágenes tomadas en PAD-IFUNAM

Aguacate Criollo: Se encuentra principalmente en mercados locales, algunos de buena calidad y otros de consistencia fibrosa. Son frutos de cáscara lisa, de color negra-violeta, delgada y suave, que se aferra a la pulpa, el peso de una pieza de aguacate varía entre 120-150 g; la semilla ocupa mayor volumen que la pulpa (relación en porcentaje de cáscara: semilla: pulpa es 11.7: 21.1: 67.2). En la **Figura 3.3**, se muestra la fotografía del aguacate criollo que se utilizó en este análisis.



*Figura 3.3. Aguacate criollo de Puebla utilizado para este trabajo.
Imágenes tomadas en PAD-IFUNAM*

Pagua: Esta especie de aguacate no es tan distribuida, ya que sólo se localizan en huertos familiares que son destinados para el autoconsumo o para la comercialización en mercados regionales. El fruto es de gran tamaño, con un peso promedio entre 370-650 g; la cáscara es gruesa, de color verde que, al pelar se rompe o desmorona fácilmente; la pulpa es amarilla-verde, de consistencia firme, no tan cremosa; el hueso es de tamaño regular, se encuentra en proporción con la pulpa. La relación en porcentaje de cáscara: semilla: pulpa es 15.3: 17.3: 67.4, en la **Figura 3.4**, se muestra el aguacate Pagua de este análisis.



*Figura 3.4. Aguacate Pagua de Nayarit utilizado para este trabajo.
Imágenes tomadas en PAD-IFUNAM*

En la **Tabla 3.1**, se observan las características de las muestras: cantidad analizada, origen, lugar y fecha de muestreo. Las muestras se obtuvieron en mercados y tiendas de autoservicio, por lo que no se cuenta con información precisa de procedencia ni condiciones de cultivo.

El aguacate, al ser una fruta climatérica, se deteriora rápidamente si no se almacena adecuadamente. El almacenamiento de las muestras estuvo en función del estado de madurez. Si el fruto se encontraba apto para consumo, las muestras se refrigeraron hasta su preparación para retrasar su descomposición o envejecimiento; o bien, se almacenaron a temperatura ambiente, para que el fruto continuara su maduración.

La cantidad de muestra para analizar, se determinó por el volumen y distribución en el contenedor de plástico que se utiliza para la medición. El aguacate, al tener tres componentes principales (cáscara, pulpa y semilla), se decidió analizar sólo la pulpa, ya que es la parte que se consume directamente, siendo el 80%, 67.2% y 67.4% del fruto de aguacate Hass, Criollo y Pagua, respectivamente.

Tabla 3.1. Características de las muestras de pulpa de aguacate analizadas

Muestra	Clave	Lugar de origen	Lugar de muestreo	Fecha de muestreo	Cantidad de muestreo (g)	Muestra de pulpa analizada (g)
Variedad Hass						
1	AHM	Michoacán	Central de Abastos Iztapalapa, CDMX	Febrero 2020	1000	700
2	AHEM	Estado de México	Central de Abastos Iztapalapa, CDMX			
3	AHT	Michoacán	Tienda UNAM			
Variedad Criollo						
4	AC	Puebla	Central de Abastos Iztapalapa, CDMX	Febrero 2020	1000	700
Pagua						
5	AP	Nayarit	Central de Abastos Iztapalapa, CDMX	Febrero 2020	1000	700

3.2. Calibración de energía

Consiste en obtener la relación entre energía depositada y canal del espectro, lo que permite determinar la energía de las emisiones detectadas, de donde se podrán obtener los radionúclidos presentes en las muestras. Se requiere de calibraciones que hagan corresponder la energía de la radiación gamma con la altura del pulso (número del canal central) en el pico de absorción total (fotopico) (Barrera *et al.*, 2008).

Para realizar este paso, se utilizan fuentes con emisiones gamma (al menos tres), cuyas energías sean conocidas con exactitud y cubran el rango de energías de interés, lo cual permitirá relacionar el número de canal con la energía del fotón o emisión gamma. Las fuentes de calibración utilizadas, se muestran en la **Tabla 3.2**, éstas deben presentar la misma geometría que las muestras a medir, es decir se deben acomodar de la misma forma dentro del contenedor.

Tabla 3.2. Fuentes de radiación gamma utilizadas para la calibración

Radioisótopo	Energía (keV)
^{241}Am	60
^{137}Cs	662
^{60}Co	1173 1332
^{40}K	1460

Estas fuentes se depositan en el contenedor de plástico, el detector colecta la información, y se obtiene el espectro de calibración (Figura 3.6). Este análisis tiene una duración de 1800 s.

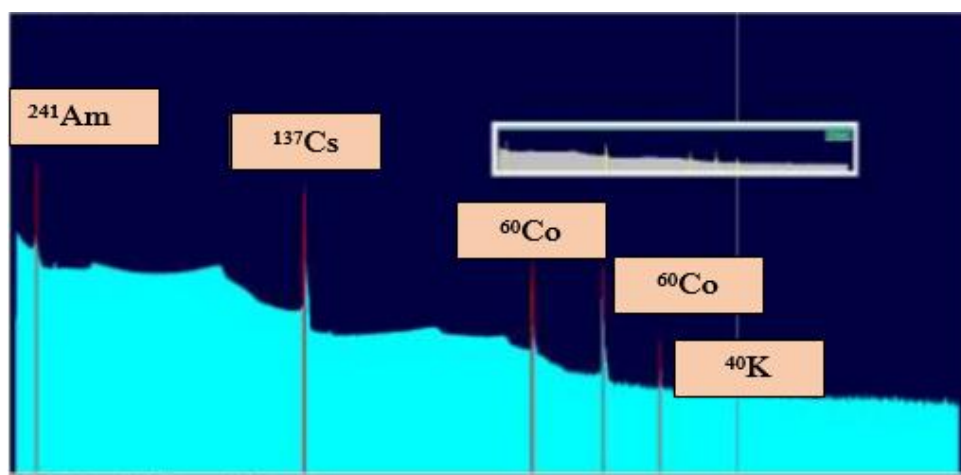


Figura 3.6. Espectro de calibración con fotopicos de Am, Cs, Co y K.

3.3. Espectro de fondo

Se denomina fondo a la contribución que no procede de la muestra en un espectro de radiación, por lo que es importante detectar la radiación ajena a la muestra de interés, con el fin de evaluar posibles interferencias y efectuar las correcciones necesarias para que el espectro obtenido, represente la radiación emitida por la muestra (Barrera *et al.*, 2008).

Las fuentes de fondo son: radiación terrestre (serie de desintegración de uranio, torio, actinio y potasio-40), radiación ambiental (isótopos de radón), radiación cósmica. En la **Figura 3.5**, se muestran las diversas contribuciones al fondo, que pueden variar por el lugar o medio ambiente donde se realiza el análisis.

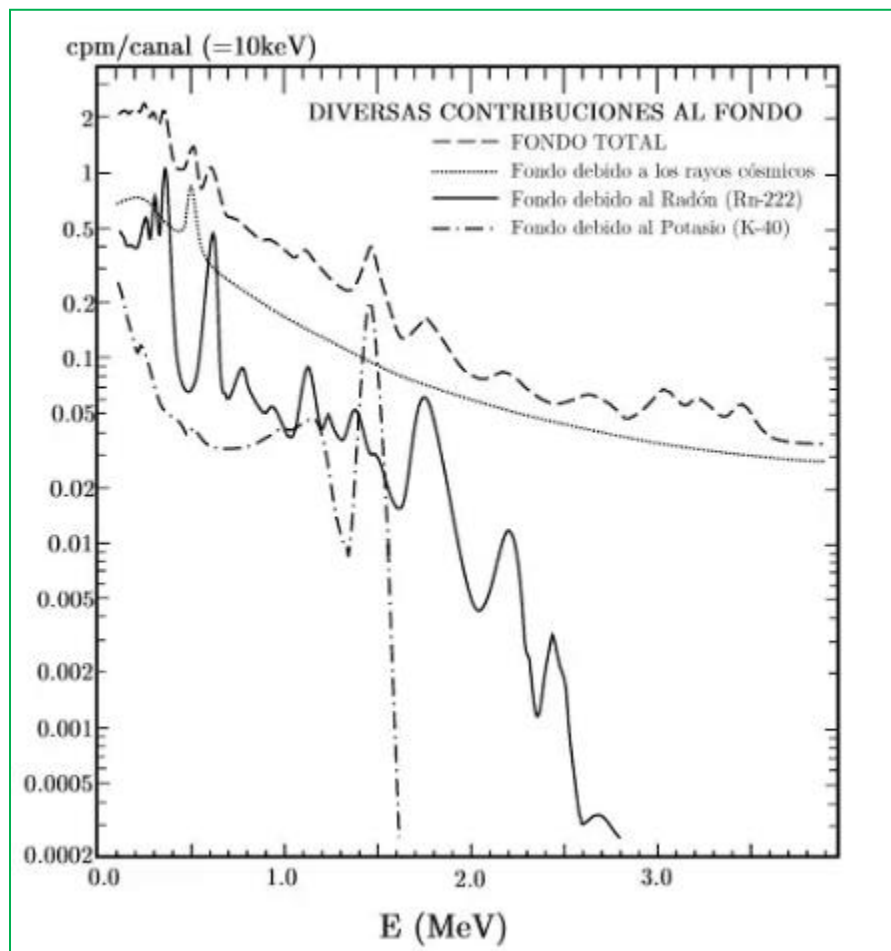


Figura 3.5. Contribuyentes del espectro de fondo (Orihuela, 2017)

Para optimizar la detección de radionúclidos en una muestra, es preciso minimizar la radiación de fondo que llega al sistema de medición, esto se logra con un blindaje, que se explicará en el capítulo 4.

3.4. Preparación de la muestra

Para la preparación de la muestra se requiere normalizar el peso, en cada análisis se pesaron 700 g de pulpa de aguacate (sin semilla ni cáscara) y se sometieron a otro proceso que se muestra en la **Figura 3.7**.

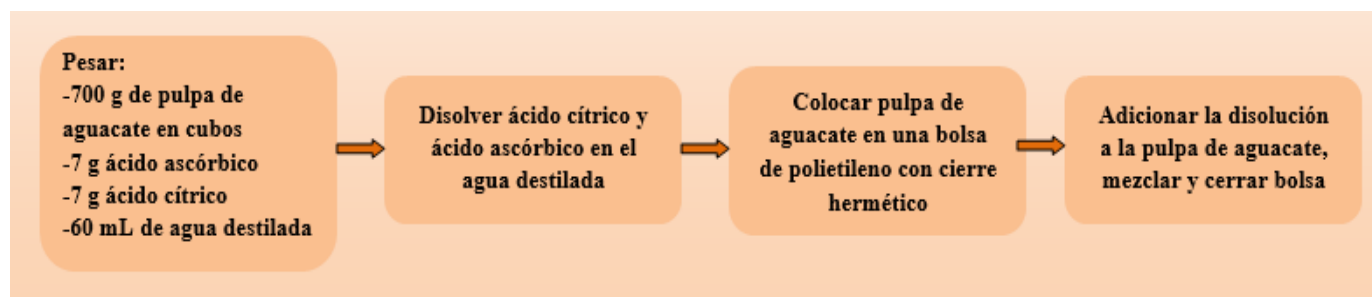


Figura 3.7. Procedimiento para la preparación de la muestra

El procedimiento de la **Figura 3.7**, se realizó con el fin de evitar la oxidación de la pulpa de aguacate, ya que es una fruta susceptible al oscurecimiento enzimático. El análisis tiene una duración de 24 horas, por eso es necesario aplicar una técnica de conservación, que permita mantener las características físicas y químicas del aguacate, para evitar la formación de compuestos no deseados que pudieran afectar la medición.

La FAO establece algunos métodos de conservación como la adición de aditivos que inhiban la actividad de la enzima polifenoloxidasas. Un estudio (Gómez, 2002) demuestra que el mejor tratamiento para la preservación de color de la pulpa de aguacate, es utilizar una disolución al 1% de ácido cítrico y 1% de ácido ascórbico. En el laboratorio se probaron diferentes opciones (**Figura 3.8**). La primera opción consistió en hacer puré la pulpa de aguacate e incorporar directamente los aditivos en seco al 1% con respecto al peso total de la pulpa de aguacate; en la segunda opción, la pulpa se cortó en pedazos de tamaño mediano y los aditivos (al 1% con respecto al peso total de pulpa de aguacate) se diluyeron en un mínimo de agua destilada; y en la tercera opción, se preparó una solución al 1% de ácido cítrico y 1% de ácido ascórbico, la pulpa de aguacate se sumergió 30 minutos en dicha solución y se retiró.



Figura 3.8. Posibles opciones para la preparación de la muestra. Imágenes tomadas en PAD-IFUNAM

Con la segunda opción, se obtuvo un mejor resultado conservando mejor la pulpa de aguacate, por lo tanto, a partir de estas pruebas, se eligió utilizar 1% de ácido cítrico y 1% de ácido ascórbico, en relación al peso de la pulpa de aguacate. Estos compuestos se diluyeron en un mínimo de agua destilada para una mejor incorporación a la muestra, que en este caso fue de 60 mL.

La muestra previamente preparada, debe rodear al detector y se debe mantener la misma geometría detector-muestra, por lo que la masa y volumen son factores importantes. Para controlar estas variables se utilizó un contenedor de plástico con capacidad de 1.5 litros, en este se coloca la bolsa de polietileno con la pulpa de aguacate ya preparada; las muestras se acomodaron de forma compacta, de tal manera que cubriera todo el contenedor para evitar espacios visibles.

3.5. Espectro de la muestra

Se establece que el tiempo total de análisis sea de 86,400 segundos. En total, se analizaron cinco muestras de aguacate sin réplicas, se realizó la preparación de la muestra y una vez colocada en el contenedor de plástico, se deposita dentro del detector. Al terminar este tiempo, se obtiene el espectro de la muestra, a través de un programa MAESTRO® diseñado por la empresa ORTEC® con versión de software 6.0 de la plataforma Microsoft Windows x32.

En este programa se adquieren datos captados por el detector, se almacenan digitalmente en una base de datos y a la par, muestra un histograma por tiempo de análisis de cuentas en pantalla, en función de la energía. Tiene la capacidad de buscar automáticamente los

fotopicos de todo el espectro, mostrando información individual de cada uno. Éstos se marcan de color rojo, para ser diferenciados en el espectro y ser localizados con mayor facilidad.

En la **Figura 3.9**, se aprecia un ejemplo del espectro de la muestra, que se obtiene de la medición. En la parte inferior de la pantalla, se puede apreciar la información individual de cada fotopico. El eje horizontal del histograma, corresponde a la energía de la radiación gamma detectada, mientras que la altura representa el número de cuentas por tiempo de análisis de cada energía.

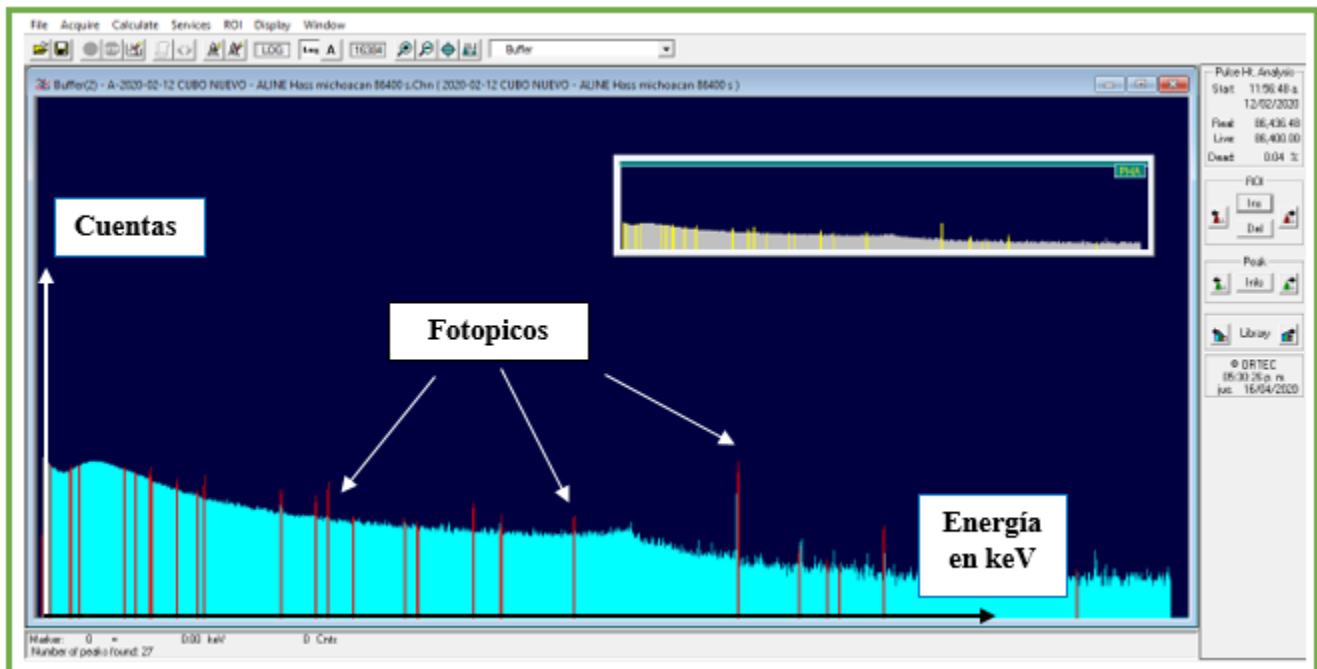


Figura 3.9. Espectro con los fotopicos obtenidos de la muestra de aguacate Hass de Michoacán, adquirido por el programa MAESTRO® de PAD-IFUNAM.

3.6. Análisis de un fotopico

La posición de un fotopico en un espectro es proporcional a la energía del fotón gamma que lo origina, es decir, cada fotopico corresponde a la energía que llega al detector, y el número de cuentas en el fotopico es proporcional a la cantidad de fotones incidentes.

El programa MAESTRO® localiza y sombrea los fotopicos en el espectro, una vez seleccionados los picos de interés (región de interés, ROI por sus siglas en inglés) y establecidos los valores de energía correspondientes, se sombrea de rojo y se muestra un cuadro emergente con información adicional de dicha región, como se observa en la **Figura 3.10**.

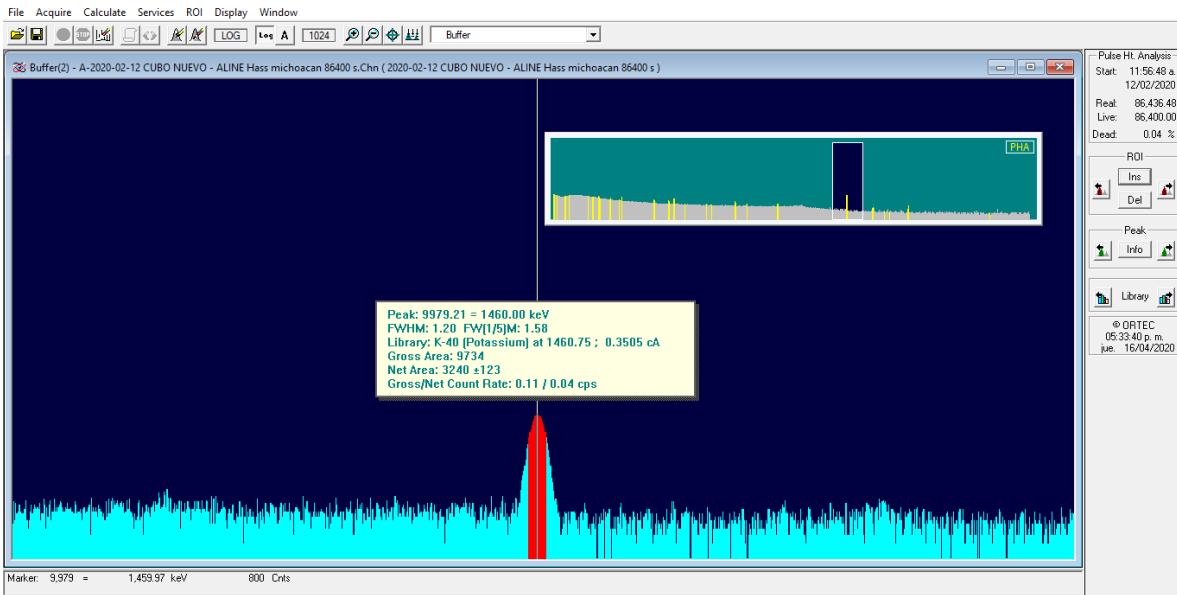


Figura 3.10. Selección de un fotopico en el espectro, como ejemplo fue el isótopo ⁴⁰K

Los fotopicos tienen una forma Gaussiana (**Figura 3.11**), por lo que el programa MAESTRO 32® del sistema de detección, realiza un ajuste matemático para proporcionar la siguiente información de cada fotopico:

- Energía del fotopico
- Centroide y el isótopo más probable que se encuentra en la base de datos
- Área gruesa: Integral del área bajo la curva (del área gruesa)
- Área neta: Integral del área bajo la curva (del área neta)
- Energía del radioisótopo y búsqueda el elemento

El software empleado en la medición, se basa en el modelo matemático de la **Figura 3.11** (Orihuela, 2017).

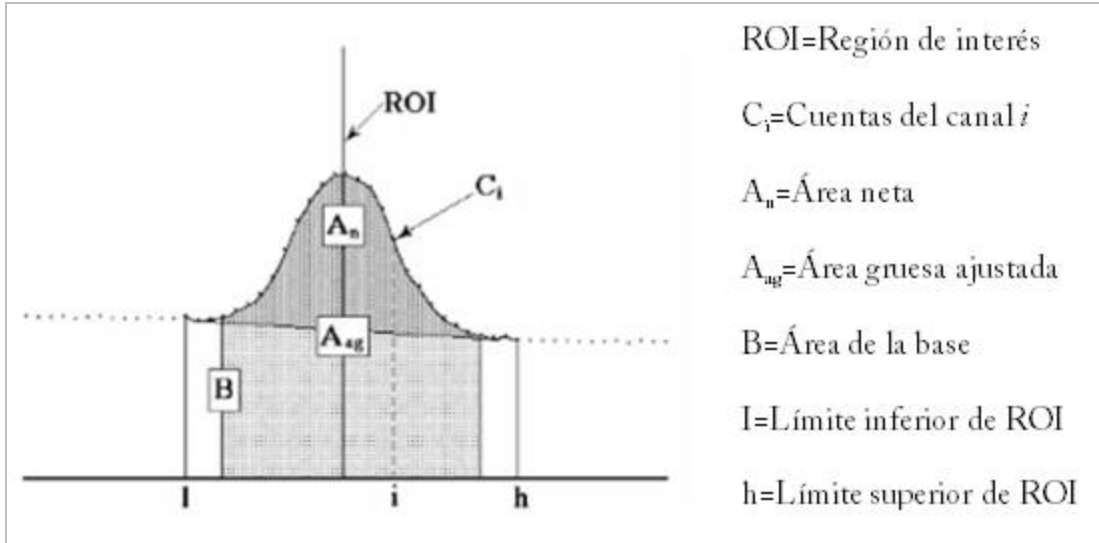


Figura 3.11. Representación de las partes de un fotopico para el cálculo en la región de interés

La ecuación de la base B de los datos es:

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

El área gruesa A_g es la suma de todas las cuentas, de todos los canales marcados en la región de interés, desde el límite inferior (I) hasta el superior (h):

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

Las cuentas del canal C_i son 6, tres en cada extremo. El área gruesa ajustada A_{ag} es la suma de todos los canales marcados en ROI, pero no usados en la base B . El área neta A_n es el área gruesa ajustada menos la base calculada:

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

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 ponderado del ajuste de la base. La incertidumbre del pico del área, está dada por la siguiente ecuación, donde σ_{Af} es la desviación estándar para el área del fotopico:

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

El software integra de manera automática todos los valores anteriores, dando información específica de cada fotopico, lo que permitirá identificar los radionúclidos presentes en la muestra de interés. En la **Figura 3.12**, se muestra la información de un fotopico de interés, proporcionada por el programa MAESTRO®.

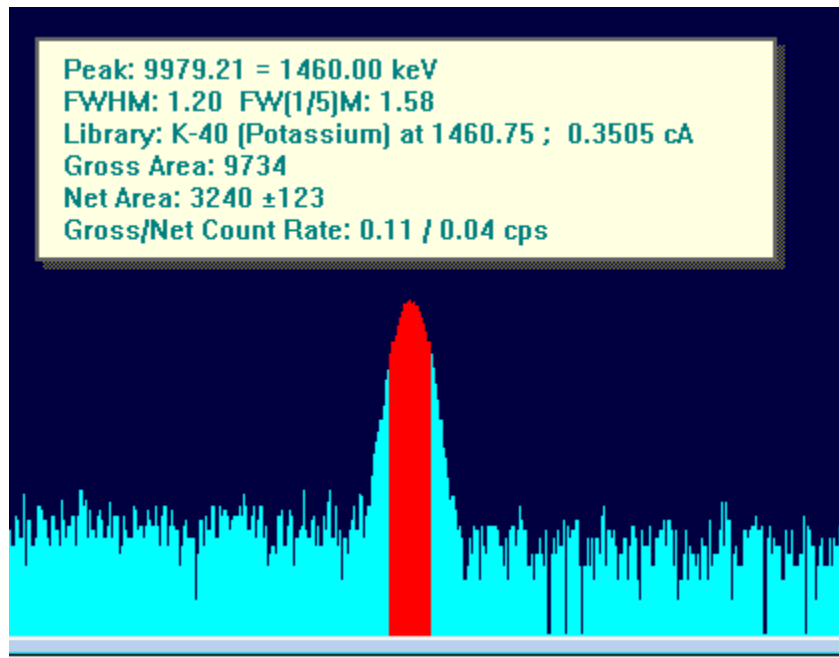


Figura 3.12. Selección de un fotopico de interés y su información correspondiente.

3.7. Análisis de contenido radiológico en las muestras

Al obtener los espectros de las muestras seleccionadas y del fondo, se hace una comparación entre los valores de área neta de los fotopicos, con el fin de determinar los radioisótopos que se encuentran realmente en la muestra; si son de interés y se encuentra en una cantidad significativa, permitirá conocer en qué cantidad se encuentran presentes en el alimento.

La comparación se hace para cada fotopico correspondiente a la misma energía obtenida, se resta el área neta registrada en el fondo (ANF), al área neta registrada de la muestra (ANM) y se obtiene el área neta ajustada (ANA), la siguiente ecuación representa esta comparación:

$$ANA = ANM - ANF$$

Para calcular la incertidumbre resultante, se utiliza la ecuación de la suma expandida de incertidumbres:

$$U_{resultante} = \sqrt{U_{muestra}^2 + U_{fondo}^2}$$

A partir de estos dos cálculos se forma un valor, el cual indicará la presencia del radioisótopo en la muestra y se representa de la siguiente manera:

$$ANA \pm U_{resultante}$$

El valor de la incertidumbre resultante, indica la presencia de un radioisótopo en la muestra (Miranda, 2000):

- Un valor mayor al obtenido de área neta ajustada, se considera dentro de incertidumbre
- Un valor negativo al obtenido de área neta ajustada, significa que el radioisótopo correspondiente está ausente en la muestra.
- Un valor positivo al obtenido de área neta ajustada, significa que el radioisótopo correspondiente, está presente de forma significativa, por lo que se calcula actividad específica para conocer el contenido real del radionúclido en la muestra.

Para fines de este trabajo, se desea determinar si algunos radioisótopos naturales y artificiales de interés están presentes (P), ausentes (A) o se encuentran dentro de incertidumbre (DDI). En caso que estén presentes en la muestra de forma significativa, se cuantifica su concentración.

Los alimentos pueden estar contaminados con radionúclidos artificiales, como consecuencia de accidentes o emergencias nucleares. Los de mayor interés para este trabajo, se engloban en la **Tabla 3.3**:

Tabla 3.3. Contenido radiológico artificial de interés para el trabajo

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

Los radioisótopos naturales que pueden provenir de las series de decaimiento natural, se encuentran en la **Tabla 3.4**. Los isótopos estables no emiten radiación gamma, por lo que no son detectados por el equipo de medición.

Tabla 3.4. Contenido radiológico natural que puede estar presente en alimentos

Cadena de decaimiento	Radioisótopos radiactivos	Radioisótopos estables
²³⁸ U	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	²⁰⁶ Pb
²³⁵ U	U-235, Th-231, Pa-231, Ac-227, Fr-223, Ra-223, At-219, Rn-223, Bi-215, Po-215, At-215, Pb-211, Bi-211, Po-211, Tl-207	²⁰⁷ Pb
²³² Th	Th-232, Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Po-212, Tl-208,	²⁰⁶ Pb
⁴⁰ K	⁴⁰ K	⁴⁰ Ca, ⁴⁰ Ar

3.8. Cálculo de potasio total en la muestra

El procedimiento utilizado para la determinación de potasio total en las muestras analizadas, se encuentra en el **anexo A2**.

Capítulo 4

Instrumentación

El sistema de análisis de radiación gamma, consta de un conjunto de dispositivos diseñados para medir fotones gamma. Para este estudio, se utilizó un detector de Germanio Hiperpuro y el software MAESTRO® de ORTEC, instalado en el Laboratorio PAD-IFUNAM. El detector es un semiconductor de Germanio de alta pureza, al cual se aplica una diferencia de potencial elevada, para establecer un campo eléctrico intenso. La radiación gamma que proviene de la muestra, interacciona con el detector mediante procesos característicos (efecto fotoeléctrico, Compton o producción de pares). La energía depositada por el fotón de la muestra, se transforma en portadores de carga que, bajo la acción del campo eléctrico, generan un pulso de corriente proporcional a dicha energía.

El detector está conectado a un sistema electrónico que amplifica la señal eléctrica, ésta a su vez se transforma en un dígito denominado canal, que es proporcional a la energía depositada por la radiación en el detector. La señal es procesada por un equipo de cómputo (software) que genera el espectro de la muestra. En la **Figura 4.1**, se describen los elementos que constituyen la instrumentación empleada:

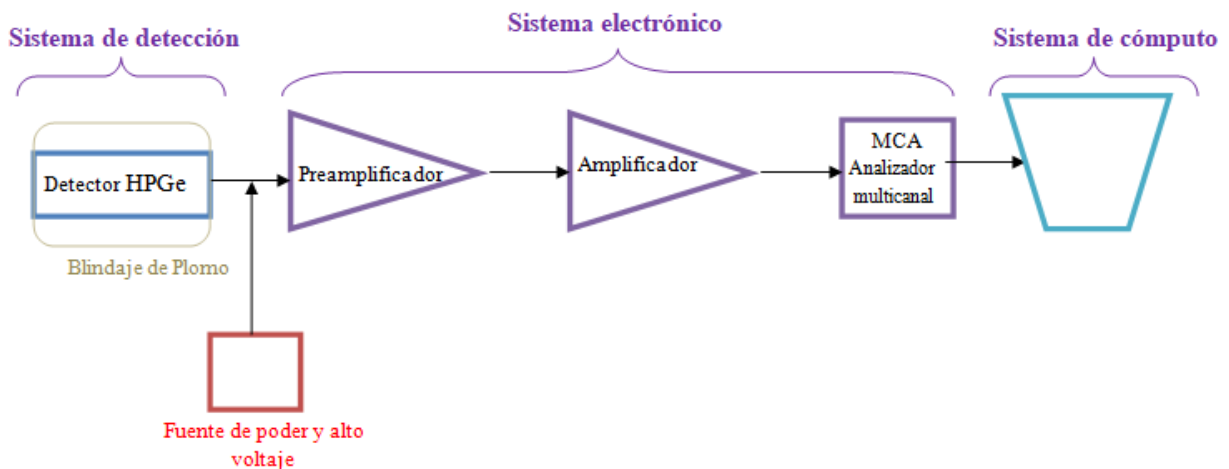


Figura 4.1. Esquema general del sistema de instrumentación utilizado

El sistema real de análisis, empleado en el laboratorio para el desarrollo del trabajo experimental, se muestra en la **Figura 4.2**:



Figura 4.2. Fotografía del sistema de detección utilizado en el laboratorio (PAD-IFUNAM)

4.1. Detector semiconductor de Germanio Hiperpuro (HPGe)

El detector de HPGe es el recomendado por la FAO por su precisión, en este caso se tiene una resolución de 3.1 keV, el cual consiste en un cristal semiconductor de Germanio hiperpuro (1 átomo de impureza por cada 10^{12} átomos de Ge) (Barrera *et al.*, 2008).

La detección de radiación mediante semiconductores, se basa en captar los portadores de carga como electrones y huecos (falta de un electrón de valencia en el nivel de unión), generados en el semiconductor como consecuencia de la energía depositada por los fotones provenientes de la radiación. Los electrones del semiconductor, se encuentran en la banda de valencia del cristal, hasta que la interacción con la radiación gamma, aporta la energía suficiente para desplazar dicho electrón a la banda de conducción. Posteriormente, gracias a la acción de un campo eléctrico exterior, los electrones que se encuentran en la banda de conducción se desplazan del cristal hasta el electrodo positivo. El desplazamiento de un electrón provoca un hueco que será cubierto por un electrón próximo. De esta manera, los huecos se mueven hacia el electrodo negativo. La llegada del electrón y el hueco a los

electrodos positivo y negativo respectivamente, producirán una señal eléctrica que será enviada a un preamplificador donde seguirá toda la cadena electrónica hasta ser procesada (Morata, 2016).

En la **Figura 4.3**, se muestra un esquema general de las partes del detector y su blindaje.

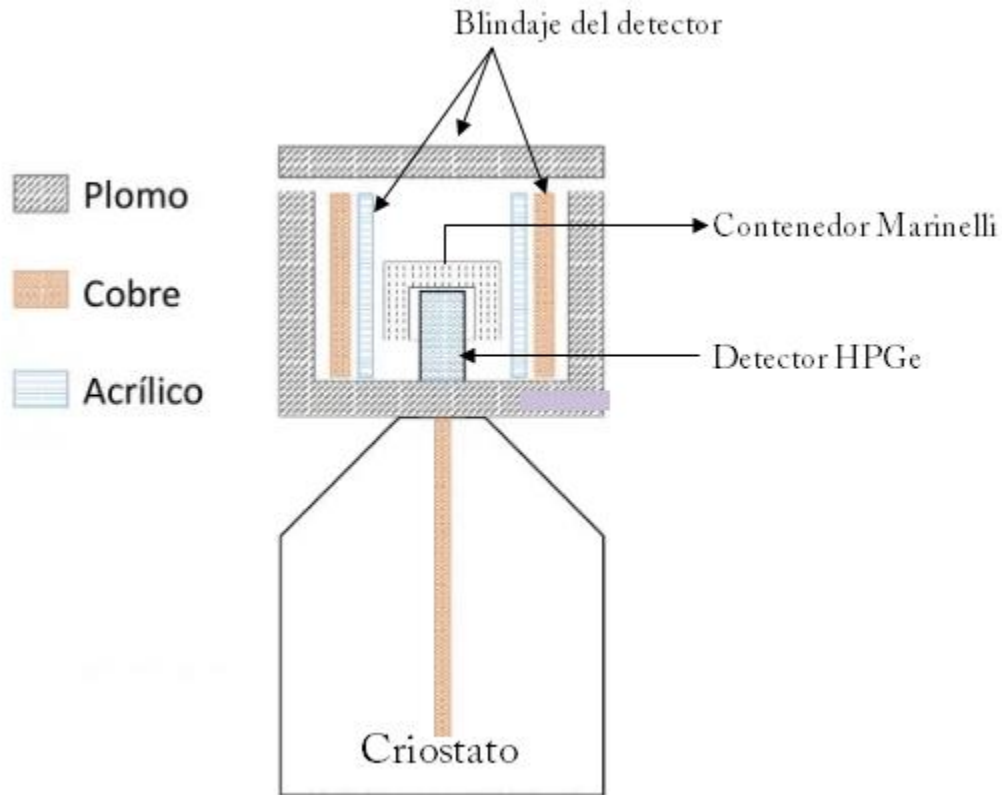


Figura 4.3. Componentes del detector HPGe y su blindaje (Orihuela, 2017)

El detector se ubica en el interior de un recipiente denominado criostato, que mediante una barra de cobre se encuentra en contacto térmico con el nitrógeno líquido. El preamplificador se sitúa inmediatamente debajo del detector, de forma que también se mantiene a baja temperatura. El funcionamiento del detector a baja temperatura, asegura que el nivel de ruido asociado a los impulsos eléctricos generados sea bajo, con lo cual se consigue una resolución energética óptima.

En la **Figura 4.4**, se observa el centro del detector empleado en este análisis, rodeado de una capa de plomo y el criostato que se utiliza para mantenerlo frío.



Figura 4.4. Detector con blindaje de plomo y criostato (PAD-IFUNAM)

4.1.1. Blindaje del detector

Para reducir los niveles de radiación de fondo, el sistema de detección se rodea con un blindaje adecuado, generalmente contruidos de materiales de alta densidad y elevado número atómico, como plomo y acero. Estos materiales poseen una antigüedad suficiente para no presentar tazas de elementos radiactivos.

El blindaje exterior del detector utilizado en el laboratorio (**Figura 4.5**), tiene una capa de plomo viejo con grosor de 7.5 cm de ancho en cada lado y 2 cm en la tapa. El blindaje interno está hecho de aluminio, cobre y lucita (polimetil metacrilato). Ambas capas se colocan con la finalidad de minimizar la radiación ambiental y de fuentes radiactivas cercanas, que puedan incidir sobre la muestra a analizar.



Figura 4.5. Blindaje del detector (PAD-IFUNAM)

4.2. Contenedor de la muestra

En la **Figura 4.6**, se observa el contenedor que se utiliza para esta medición; es un recipiente de polietileno con capacidad de 1.5 L, donde la muestra se coloca al interior, obteniendo una distribución uniforme que permite mantener el mismo peso y la misma geometría de detección para todas las muestras. También se puede emplear un contenedor de plástico llamado “Marinelli”.



Figura 4.6. Contenedor de plástico utilizado en el laboratorio (PAD-IFUNAM)

4.3. Sistema electrónico

Una vez que los impulsos eléctricos son generados por el detector, éstos deben ser amplificados, procesados y analizados por la cadena electrónica asociada, para obtener un espectro con varios picos. El sistema electrónico que se observa en la **Figura 4.7**, consta de una fuente de alto voltaje que alimenta al detector, un preamplificador, amplificador, analizador multicanal y el sistema de cómputo que almacena los datos que arroja el sistema de detección, mediante el programa MAESTRO-36 v6 ORTEC®.



Figura 4.7. Componentes del sistema electrónico del laboratorio (PAD-IFUNAM)

4.3.1. Fuente de alto voltaje

La fuente de poder se encarga de establecer el campo eléctrico en el interior del detector. Proporciona un voltaje de +3,500 V, con regulación de $\pm 0.1\%$. Esta fuente incorpora un inhibidor de voltaje de forma que, cuando el detector se calienta, si se acaba el nitrógeno líquido, el voltaje se reduce a cero.

4.3.2. Preamplificador

Tiene la finalidad de acoplar los niveles de carga eléctrica generados en el detector y enviarlas como señal de entrada al amplificador para optimizar el procesamiento de señales. Por esta razón, el detector y el preamplificador, se instalan juntos en el criostato.

4.3.3. Amplificador

Las señales, una vez niveladas en el preamplificador, se dirigen hacia el amplificador, cuya función es aumentar la intensidad de la señal para que sea procesada por el multicanal.

4.3.4. Analizador Multicanal (MCA)

El analizador multicanal clasifica y registra simultáneamente pulsos que caen en muchas bandas de energía diferentes. Para un analizador dado, el rango de energía total escaneado, se divide en incrementos iguales llamados canales.

El MCA utilizado en este trabajo es el recomendado por la FAO. Este dispositivo determina la altura de los pulsos eléctricos procedentes del amplificador, transformando la señal en canales, acumulando el número de pulsos generados por cada canal. Cada uno de los pulsos, corresponden a cada energía de los elementos radiactivos que están presentes en la muestra analizada. Para definir la presencia y contenido de radionúclidos, se hace el análisis de la altura de los pulsos, segmentando cada pulso en 16, 000 canales o partes.

4.3.5. Equipo de cómputo

La información que se obtiene tras analizar las muestras, son interpretados en un histograma o espectro que genera el programa MAESTRO®-32 v6 ORTEC®, como se observa en la **Figura 4.8**. El programa de análisis de espectros, tiene la finalidad de convertir los picos y el canal donde se hallan, en los radioisótopos presentes y su actividad.

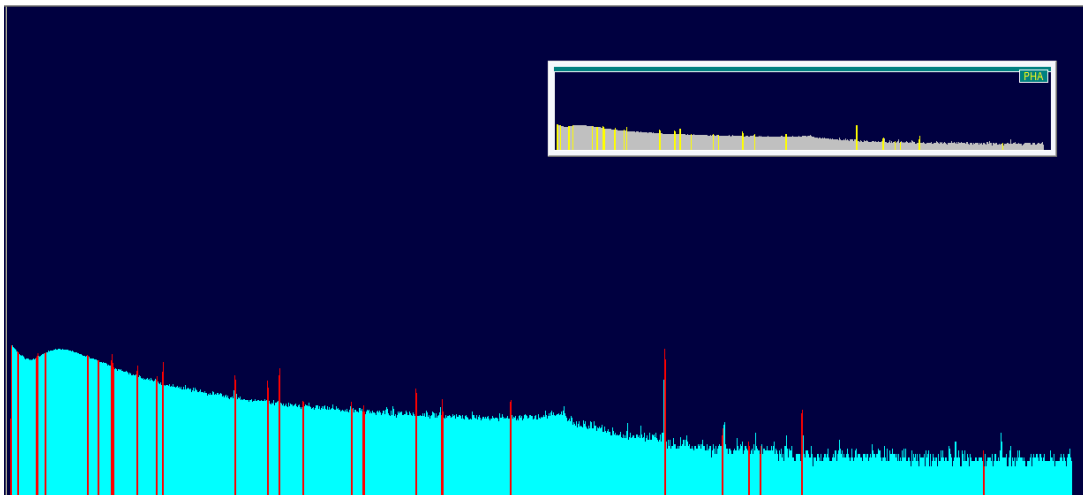


Figura 4.8. Espectro de una muestra de aguacate Hass de Michoacán, generado por el programa utilizado en este trabajo.

El programa MAESTRO®, realiza los cálculos de la región de interés de forma automática, como se observa en la **Figura 4.9**, da información del área neta, área gruesa, así como el centroide del fotopico y el probable radionúclido al que corresponde la energía del centroide.

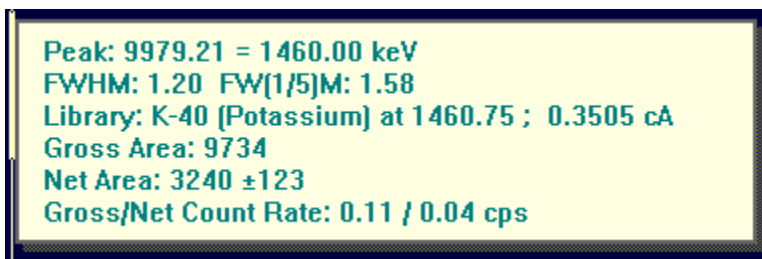


Figura 4.9. Información del fotopico generada por el programa MAESTRO®

Además, en la pantalla del programa (**Figura 4.10**) se encuentra la información del canal con su respectiva energía asociada, así como las cuentas que registró el detector durante el tiempo de análisis. El canal que se debe seleccionar, es aquel que tenga mayor número de cuentas dentro de la región de interés.

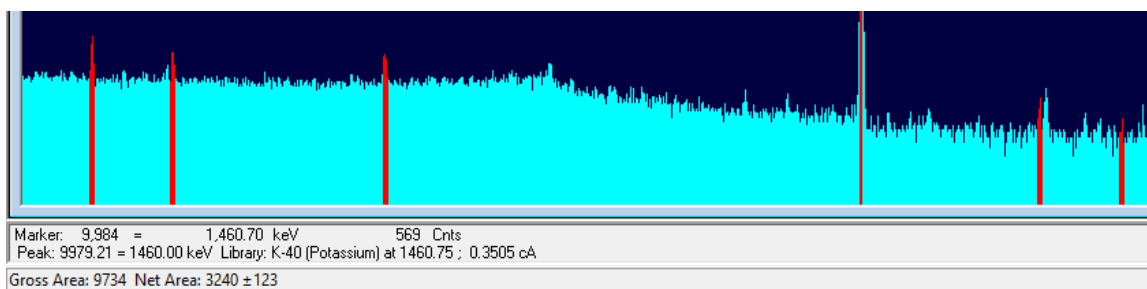


Figura 4.10. Información del canal seleccionado

La parte experimental se desarrolló, gracias a las facilidades y las instalaciones del laboratorio 25 del Proyecto de Aplicaciones de Dosimetría en el edificio Van de Graaff del Instituto de Física de la UNAM.

Capítulo 5

Resultados, discusión y conclusiones

Mediante el programa MAESTRO-32 v6 ORTEC®, se obtuvieron los espectros de calibración, fondo y muestras, que permitieron evaluar los diferentes picos de energía y valores de área neta asociados, para determinar la presencia o ausencia de radioisótopos en las muestras de aguacate.

5.1. Calibración de energía

La calibración de energía del equipo de análisis (multicanal y detector), se realizó bajo las mismas condiciones de trabajo que las muestras. El tiempo de análisis fue de 1,800 s y se utilizaron cuatro fuentes radiactivas patrón de energías bien definidas: ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co y ^{40}K .

En el espectro de calibración de la **Figura 5.1**, se puede identificar el número de canal y área neta asociada a cada radioisótopo. En la **Tabla 5.1**, se muestran las fuentes de radiación gamma, así como la energía de emisión asociada, número de canal y área neta correspondiente a cada fotopico.

Tabla 5.1. Fuentes de radiación gamma utilizadas para la calibración de energía

Radioisótopo	Energía (keV)	Número de Canal	Área neta
^{241}Am	60	403	369970 ± 1178
^{137}Cs	662	4533	206702 ± 514
^{60}Co	1173	8042	4953 ± 89
	1332	9134	4279 ± 77
^{40}K	1460	10012	137 ± 24

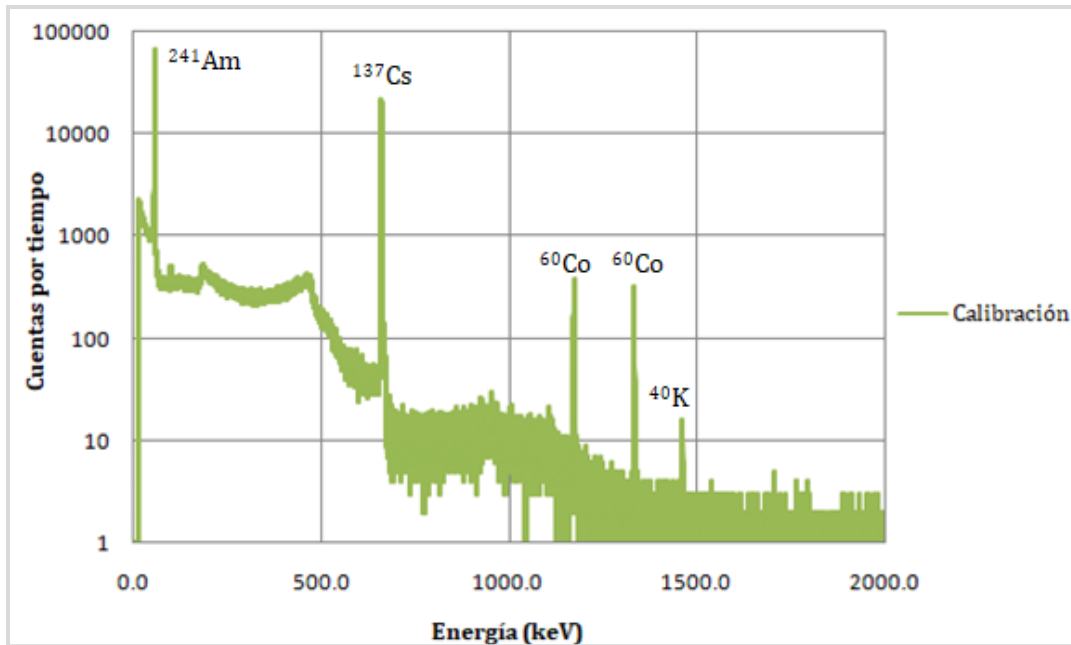


Figura 5.1. Espectro de calibración de energía

Con los puntos obtenidos (energía, canal) del espectro de calibración, se puede ajustar a una función generalmente lineal. En la **Figura 5.2**, se observa la linealidad de la calibración, que posteriormente se utilizará para identificar las energías de los fotopicos de radionúclidos, en diferentes muestras de interés (Cornejo, 2009).

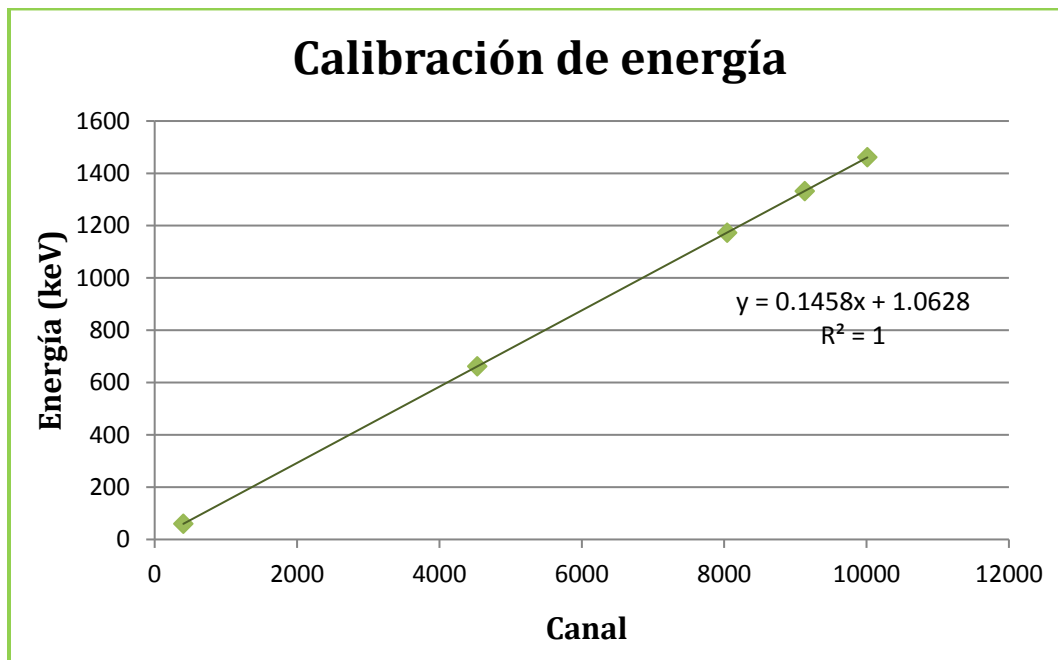


Figura 5.2. Curva de calibración de energía

5.2. Espectro de fondo

En la **Figura 5.3**, se muestra el espectro de fondo obtenido bajo las mismas condiciones que las muestras con tiempo de análisis de 24 horas.

Se identificaron los fotopicos presentes en el espectro. De acuerdo a la energía de cada fotopico, se asoció con el radioisótopo correspondiente y se les asignó un número para facilitar la comparación con las muestras de interés.

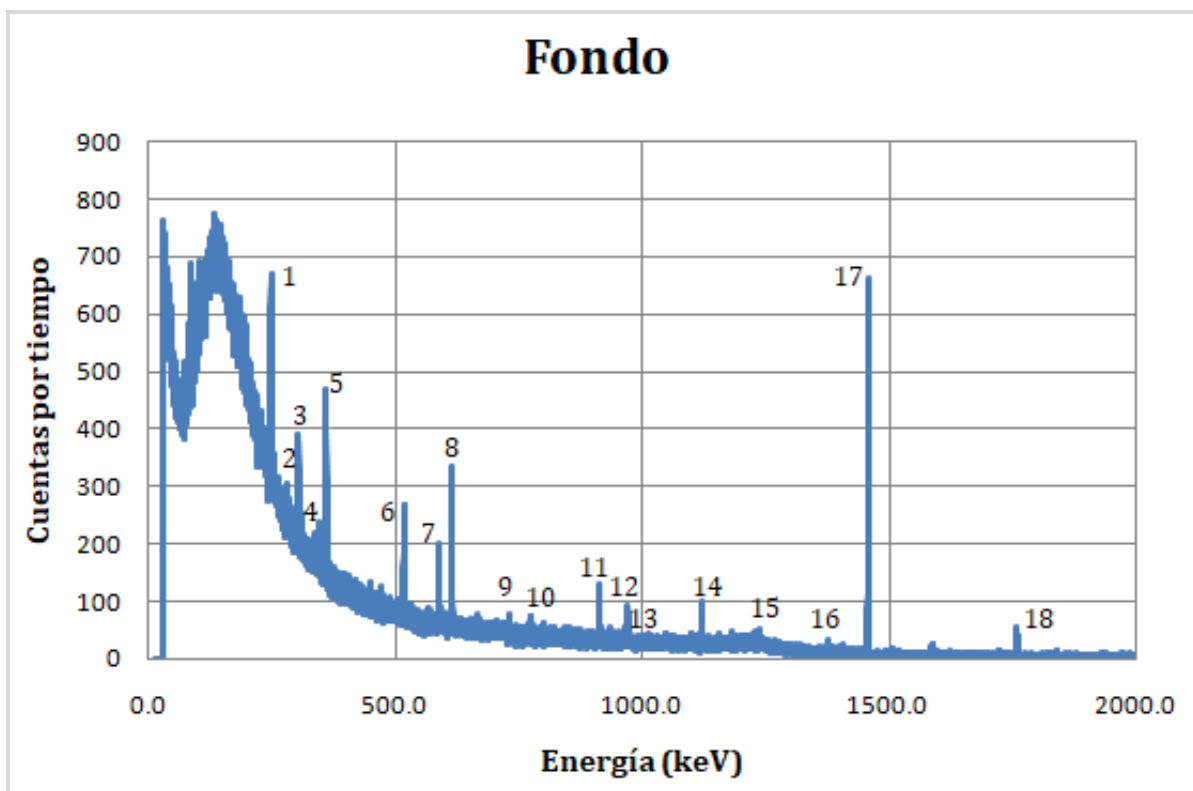


Figura 5.3. Espectro de fondo con fotopicos identificados

En la **Tabla 5.2**, se encuentra la información obtenida con respecto a cada radioisótopo identificado en el espectro de fondo, así como la energía y área neta asociada a cada pico encontrado.

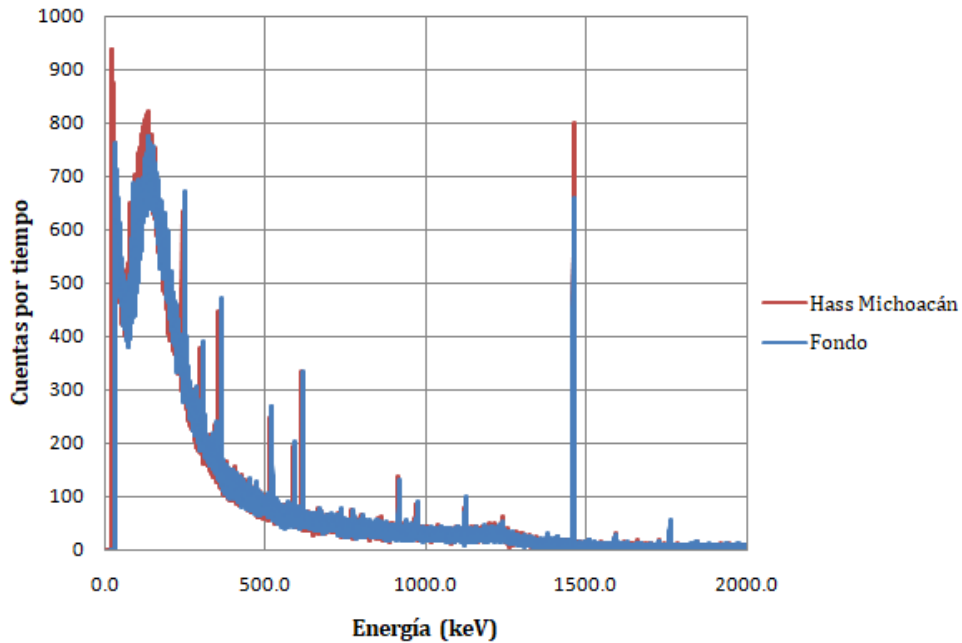
Tabla 5.2. Identificación de radioisótopos en el espectro de fondo.

Fotopico	Radioisótopo	Energía (keV)	Área Neta
1	Pb-212	238.6	2191 ± 180
2	Tl-208	276.0	112 ± 199
3	Pb-214	295.2	956 ± 226
4	Ac-228	338.5	508 ± 196
5	Pb-214	352.0	2280 ± 144
6	Tl-208	510.7	3435 ± 223
7	Tl-208	583.2	1112 ± 109
8	Bi-214	609.3	2544 ± 131
9	Bi-212	727.2	303 ± 94
10	Bi-214	769.0	337 ± 91
11	Ac-228	911.0	967 ± 108
12	Ac-228	964.0	281 ± 75
13	Ac-228	969.0	542 ± 77
14	Bi-214	1120.4	824 ± 97
15	Bi-214	1238.2	219 ± 78
16	Bi-214	1376.7	122 ± 50
17	K-40	1462.0	9649 ± 130
18	Bi-214	1764.0	648 ± 42

5.3. Espectros de las muestras

Para visualizar los espectros de las muestras y fondo, se utilizó el programa MAESTRO- 32 v6 ORTEC ®. Se analizaron 5 muestras (3 aguacates Hass de diferente lugar, un aguacate criollo y un pagua), se sometieron a una preparación previa al análisis, de acuerdo a la metodología establecida en el capítulo 3. Cada muestra se analizó en el equipo de detección durante 24 horas, los datos obtenidos en los espectros, se compararon con el espectro de fondo. Los espectros y el análisis de los fotopicos de las muestras seleccionadas, se observan a continuación. En las tablas se presenta el número de fotopicos, radioisótopos identificados con su energía asociada, área neta total de la muestra y del fondo, así como área neta ajustada que corresponde al área neta real de la muestra.

5.3.1. Aguacate Hass Michoacán (AHM)



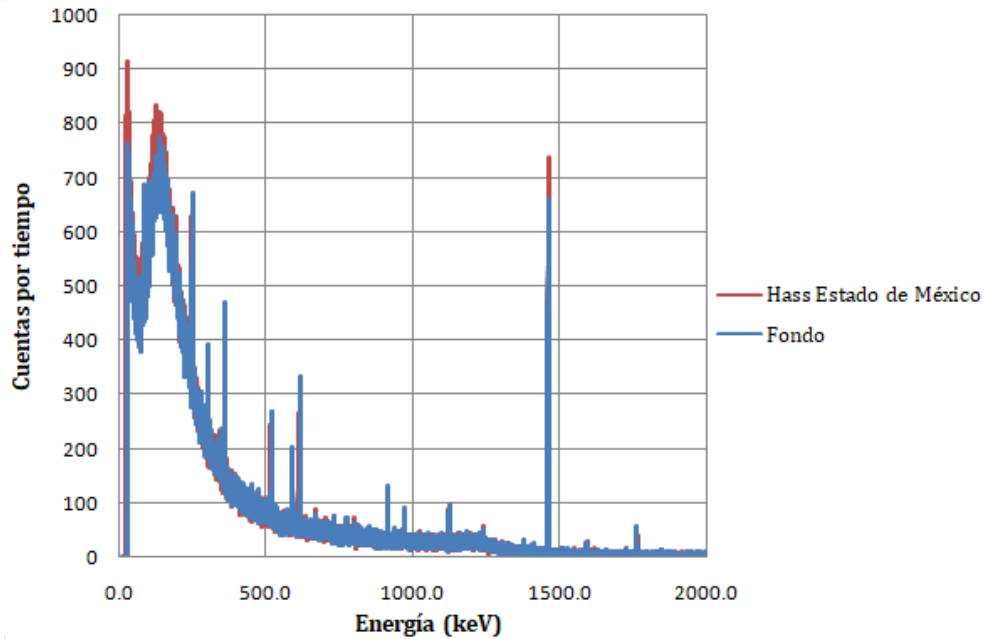
Gráfica 5.1. Comparación de espectros de AHM y fondo.

Tabla 5.3. Identificación de radioisótopos encontrados en AHM, comparados con el fondo.

Fotopico	Radioisótopo	Energía (keV)	Área Neta AHM	Área Neta Fondo	Área Neta ajustada	Presencia en la muestra
1	Pb-212	238.6	1868 ± 167	2191 ± 180	-323 ± 246	A
2	Tl-208	276.0	59 ± 163	112 ± 199	-53 ± 164	A
3	Pb-214	295.2	882 ± 180	956 ± 226	-74 ± 289	A
4	Ac-228	338.5	191 ± 210	508 ± 196	-317 ± 287	A
5	Pb-214	352.0	2137 ± 199	2280 ± 144	-143 ± 246	A
6	Tl-208	510.7	2816 ± 193	3435 ± 223	-619 ± 295	A
7	Tl-208	583.2	1203 ± 135	1112 ± 109	91 ± 174	DDI
8	Bi-214	609.3	2221 ± 130	2544 ± 131	-323 ± 185	A
9	Bi-212	727.2	210 ± 90	303 ± 94	-93 ± 130	A
10	Bi-214	769.0	197 ± 64	337 ± 91	-140 ± 111	A
11	Ac-228	911.0	935 ± 88	967 ± 108	-32 ± 139	A
12	Ac-228	964.0	250 ± 49	281 ± 75	-31 ± 90	A
13	Ac-228	969.0	512 ± 97	542 ± 77	-30 ± 124	A
14	Bi-214	1120.4	630 ± 111	824 ± 97	-194 ± 147	A
15	Bi-214	1238.2	220 ± 48	219 ± 78	1 ± 92	DDI
16	Bi-214	1376.7	129 ± 49	122 ± 50	7 ± 70	DDI
17	K-40	1462.0	11116 ± 126	9649 ± 130	1467 ± 181	P
18	Bi-214	1764.0	569 ± 53	648 ± 42	-79 ± 68	A

A=Ausente; P=Presente; DDI=Dentro de Incertidumbre

5.3.2. Aguacate Hass Estado de México (AHM)



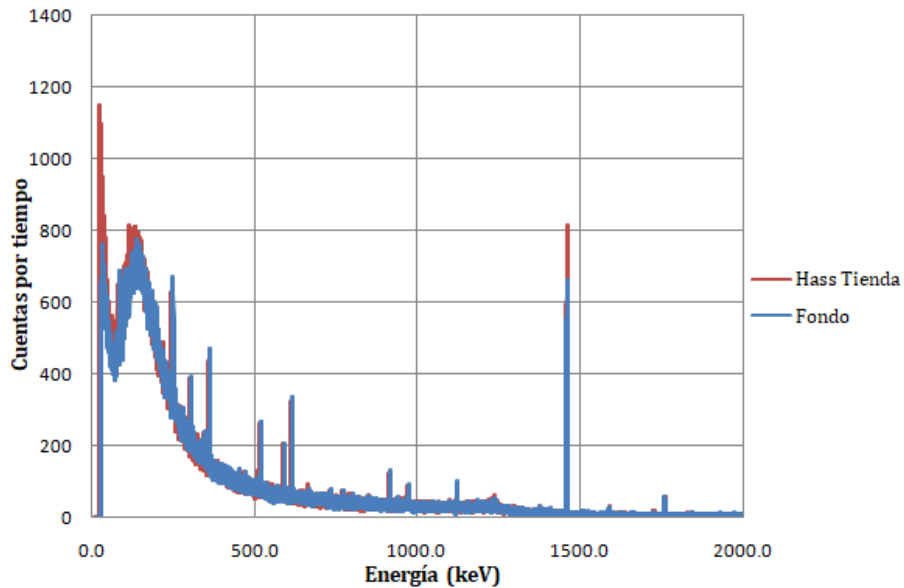
Gráfica 5.2. Comparación de espectros de AHM y fondo.

Tabla 5.4. Identificación de radioisótopos encontrados en AHM, comparados con el fondo.

Fotopico	Radioisótopo	Energía (keV)	Área Neta AHM	Área Neta Fondo	Área Neta Ajustada	Presencia en la muestra
1	Pb-212	238.6	1679	2191 ± 180	-512 ± 310	A
2	Tl-208	276.0	123	112 ± 199	11 ± 101	DDI
3	Pb-214	295.2	951	956 ± 226	-5 ± 311	A
4	Ac-228	338.5	390	508 ± 196	-118 ± 257	A
5	Pb-214	352.0	1975	2280 ± 144	-305 ± 219	A
6	Tl-208	510.7	2860	3435 ± 223	-575 ± 325	A
7	Tl-208	583.2	1026	1112 ± 109	-86 ± 164	A
8	Bi-214	609.3	2273	2544 ± 131	-271 ± 191	A
9	Bi-212	727.2	69	303 ± 94	-234 ± 116	A
10	Bi-214	769.0	182	337 ± 91	-155 ± 118	A
11	Ac-228	911.0	902	967 ± 108	-65 ± 143	A
12	Ac-228	964.0	249	281 ± 75	-32 ± 95	A
13	Ac-228	969.0	512	542 ± 77	-30 ± 110	A
14	Bi-214	1120.4	561	824 ± 97	-263 ± 127	A
15	Bi-214	1238.2	257	219 ± 78	38 ± 117	DDI
16	Bi-214	1376.7	221	122 ± 50	99 ± 77	DDI
17	K-40	1462.0	10651	9649 ± 130	1002 ± 182	P
18	Bi-214	1764.0	673	648 ± 42	25 ± 63	DDI

A=Ausente; P=Presente; DDI=Dentro de Incertidumbre

5.3.3. Aguacate Hass “Tienda” (AHT)



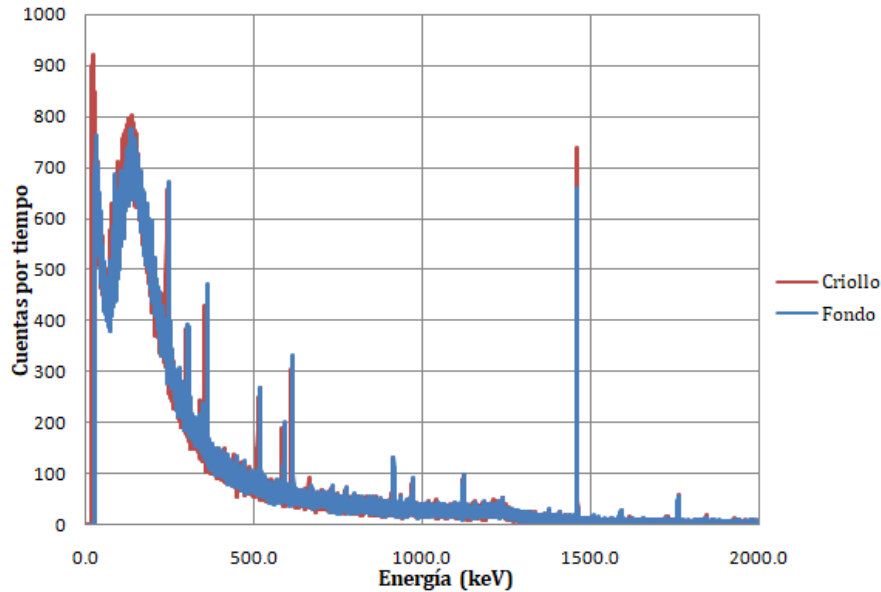
Gráfica 5.3. Comparación de espectros de AHT y fondo.

Tabla 5.5. Identificación de radioisótopos encontrados en AHT, comparados con el fondo.

Fotopico	Radioisótopo	Energía (keV)	Área Neta AHT	Área Neta Fondo	Área Neta Ajustada	Presencia en la muestra
1	Pb-212	238.6	1839 ± 190	2191 ± 180	-352 ± 262	A
3	Pb-214	295.2	720 ± 149	956 ± 226	-236 ± 271	A
4	Ac-228	338.5	506 ± 124	508 ± 196	-2 ± 232	A
5	Pb-214	352.0	2000 ± 162	2280 ± 144	-280 ± 217	A
6	Tl-208	510.7	2675 ± 191	3435 ± 223	-760 ± 294	A
7	Tl-208	583.2	1271 ± 131	1112 ± 109	159 ± 170	DDI
8	Bi-214	609.3	2325 ± 148	2544 ± 131	-219 ± 198	A
9	Bi-212	727.2	174 ± 66	303 ± 94	-129 ± 115	A
10	Bi-214	769.0	91 ± 76	337 ± 91	-246 ± 119	A
11	Ac-228	911.0	950 ± 90	967 ± 108	-17 ± 141	A
12	Ac-228	964.0	225 ± 59	281 ± 75	-56 ± 95	A
13	Ac-228	969.0	470 ± 74	542 ± 77	-72 ± 107	A
14	Bi-214	1120.4	663 ± 97	824 ± 97	-161 ± 137	A
15	Bi-214	1238.2	256 ± 73	219 ± 78	37 ± 107	DDI
16	Bi-214	1376.7	99 ± 63	122 ± 50	-23 ± 80	A
17	K-40	1462.0	10889 ± 120	9649 ± 130	1240 ± 177	P
18	Bi-214	1764.0	654 ± 46	648 ± 42	6 ± 62	DDI

A=Ausente; P=Presente; DDI=Dentro de Incertidumbre

5.3.4. Aguacate Criollo (AC)



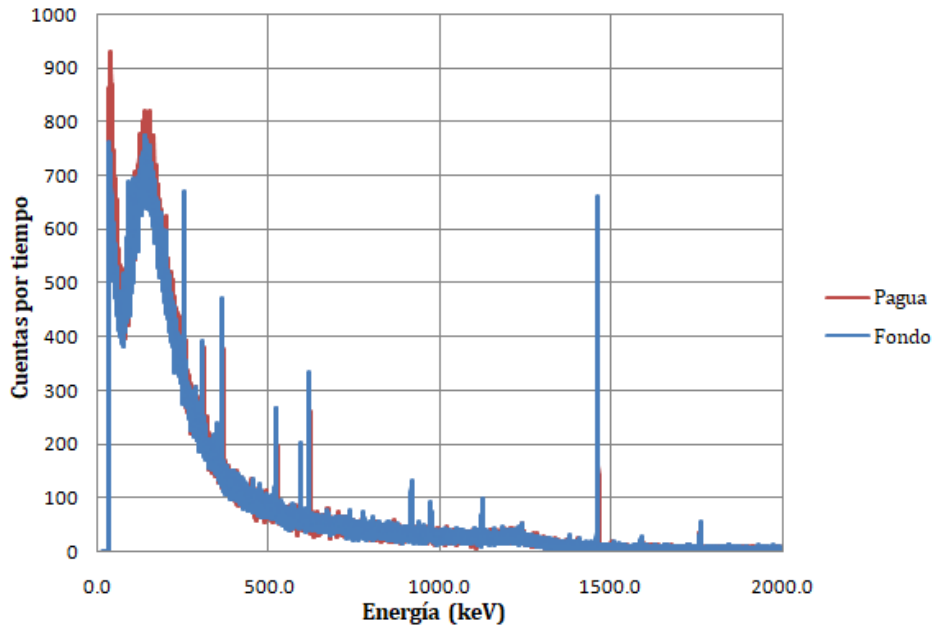
Gráfica 5.4. Comparación de espectros de AC y fondo.

Tabla 5.6. Identificación de radioisótopos encontrados en AC, comparados con el fondo.

Fotopico	Radioisótopo	Energía (keV)	Área Neta AC	Área Neta Fondo	Área Neta ajustada	Presencia en la muestra
1	Pb-212	238.6	1157 ± 142	2191 ± 180	-1034 ± 229	A
2	Tl-208	276.0	113 ± 99	112 ± 199	1 ± 101	DDI
3	Pb-214	295.2	1068 ± 143	956 ± 226	112 ± 267	DDI
4	Ac-228	338.5	354 ± 134	508 ± 196	-154 ± 237	A
5	Pb-214	352.0	1742 ± 182	2280 ± 144	-538 ± 232	A
6	Tl-208	510.7	2888 ± 185	3435 ± 223	-547 ± 290	A
7	Tl-208	583.2	948 ± 100	1112 ± 109	-164 ± 148	A
8	Bi-214	609.3	2094 ± 138	2544 ± 131	-450 ± 190	A
9	Bi-212	727.2	202 ± 76	303 ± 94	-101 ± 121	A
10	Bi-214	769.0	218 ± 78	337 ± 91	-119 ± 120	A
11	Ac-228	911.0	847 ± 88	967 ± 108	-120 ± 139	A
12	Ac-228	964.0	127 ± 57	281 ± 75	-154 ± 94	A
13	Ac-228	969.0	492 ± 67	542 ± 77	-50 ± 102	A
14	Bi-214	1120.4	594 ± 112	824 ± 97	-230 ± 148	A
15	Bi-214	1238.2	289 ± 85	219 ± 78	70 ± 115	DDI
16	Bi-214	1376.7	188 ± 47	122 ± 50	66 ± 69	DDI
17	K-40	1462.0	10241 ± 118	9649 ± 130	592 ± 176	P
18	Bi-214	1764.0	631 ± 49	648 ± 42	-17 ± 65	A

A=Ausente; P=Presente; DDI=Dentro de Incertidumbre

5.3.5. Aguacate Pagua (P)



Gráfica 5.5. Comparación de espectros de P y fondo.

Tabla 5.7. Identificación de radioisótopos encontrados en P, comparados con el fondo.

Fotopico	Radioisótopo	Energía (keV)	Área Neta P	Área Neta Fondo	Área Neta ajustada	Presencia en la muestra
1	Pb-212	238.6	1925 ± 190	2191 ± 180	-266 ± 262	A
2	Tl-208	276.0	77 ± 54	112 ± 199	-35 ± 57	A
3	Pb-214	295.2	874 ± 144	956 ± 226	-82 ± 268	A
4	Ac-228	338.5	299 ± 167	508 ± 196	-209 ± 257	A
5	Pb-214	352.0	2141 ± 190	2280 ± 144	-139 ± 238	A
6	Tl-208	510.7	3034 ± 272	3435 ± 223	-401 ± 352	A
7	Tl-208	583.2	1046 ± 100	1112 ± 109	-66 ± 148	A
8	Bi-214	609.3	2203 ± 130	2544 ± 131	-341 ± 185	A
9	Bi-212	727.2	142 ± 136	303 ± 94	-161 ± 165	A
10	Bi-214	769.0	121 ± 64	337 ± 91	-216 ± 111	A
11	Ac-228	911.0	874 ± 129	967 ± 108	-93 ± 168	A
12	Ac-228	964.0	55 ± 43	281 ± 75	-226 ± 86	A
13	Ac-228	969.0	323 ± 69	542 ± 77	-219 ± 103	A
14	Bi-214	1120.4	569 ± 80	824 ± 97	-255 ± 126	A
15	Bi-214	1238.2	196 ± 70	219 ± 78	-23 ± 105	A
16	Bi-214	1376.7	45 ± 26	122 ± 50	-77 ± 56	A
17	K-40	1462.0	8918 ± 141	9649 ± 130	-731 ± 192	A
18	Bi-214	1764.0	527 ± 46	648 ± 42	-121 ± 62	A

A=Ausente; P=Presente; DDI=Dentro de Incertidumbre

5.4. Potasio total presente en las muestras

Al encontrar presencia de potasio en los espectros, se cuantifica la concentración en la que está presente en el aguacate. Para ello, es necesario evaluar la eficiencia de conteo del equipo de detección, ya que se requieren ciertos datos para determinar el contenido de potasio total. En el **anexo A.2**, se muestra la explicación de los cálculos correspondientes para esta determinación.

En esta sección, sólo se realiza la sustitución de valores de las ecuaciones que permitirán cuantificar potasio total en las muestras.

-Actividad específica (teórica) de ^{40}K

La ley de decaimiento, establece que la actividad específica equivale al número de desintegraciones por segundo por gramo, como se representa en la ecuación 2, obteniendo un valor de 31.206 Bq/g de K (teórica).

$$A_K = \frac{N_A * a * \ln 2}{100 * MW * T_{1/2}} = \frac{6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} * 0.0118 * \ln 2}{100 * (39.098 \text{ g/mol} * 4.037 \times 10^{16} \text{ s})} = 31.206 \frac{\text{Bq}}{\text{g de K}}$$

-Eficiencia de conteo del equipo (E_f)

De acuerdo con la ecuación de eficiencia de conteo en porcentajes (ecuación 3), al sustituir los datos obtenidos del análisis del estándar de KCl, específicamente del área neta de fondo y estándar, se calcula un porcentaje de eficiencia de 0.276%.

$$\%E_f = \frac{162057 - 4395}{31.206 \frac{\text{Bq}}{\text{g de K}} * 0.11 * 192.263 \text{ g K} * 86400 \text{ s}} \times 100 = 0.276 \%$$

En la **Tabla 5.8**, se resumen los datos obtenidos del análisis por espectrometría gamma del estándar de KCl.

Tabla 5.8. Resultados del análisis de eficiencia de conteo

Estándar	g KCl	g K	Área neta ^{40}K (estándar)	Área neta ^{40}K (fondo)	%Eficiencia
KCl sólido	366.600	192.263	162057	4395	0.276

Después de calcular la eficiencia de detección, y tras obtener los espectros de análisis de las muestras mediante espectrometría gamma, se puede determinar la actividad específica de una muestra en particular, con ayuda de la ecuación 4.

-Actividad específica de la muestra estándar (A_{SK})

Al sustituir los valores en la ecuación 4, se obtiene que la actividad específica de la muestra estándar es 16.367 Bq/g.

$$A_{SK} = \frac{\frac{A_{neta\ estándar} - A_{neta\ fondo}}{t_a}}{m_{KCl} * E_f * A_Y}$$

$$A_{SK} = \frac{\frac{162057 - 4721}{86400\ s}}{366.6\ g\ KCl * 0.00276 * 0.11} = 16.367\ Bq/g$$

-Actividad específica de la muestra de Aguacate Hass Michoacán (A_{AHM})

Con la misma ecuación 4, al igual que en el análisis del estándar de KCl, se determinó la actividad específica de todas las muestras. Como ejemplo de cálculo, se utilizan los datos obtenidos del espectro de la muestra Aguacate Hass Michoacán (AHM), obteniendo una actividad específica de AHM de 0.080 Bq/g de muestra.

$$A_{AHM} = \frac{A_{na}/t_a}{m_{mu} * E_f * A_Y}$$

$$A_{AHM} = \frac{1467/86400\ s}{700\ g\ AHM * 0.002 * 0.11} = 0.080\ Bq/g\ AHM$$

-Concentración de Potasio en la muestra estándar

Para conocer el contenido de potasio total en cada muestra, se relaciona la actividad específica de ^{40}K elemental (A_K) con la actividad específica del mismo radioisótopo registrado en la muestra de interés (A_{SK}). Con la ecuación 5, se conoce que la concentración de potasio en el estándar analizado es 192.282 g.

$$m_K = \frac{A_{SK}}{A_K} \times m_{KCl}$$

$$m_K = \frac{16.367 \text{ Bq/g}}{31.206 \text{ Bq/g}} \times 366.6000 \text{ g KCl} = 192.282 \text{ g K}$$

-Porcentaje de error

Teóricamente en los 366.6 g de KCl (estándar), 192.263 g pertenecen a Potasio y el resto al cloro. El equipo utilizado para el análisis, cuantificó 192.282 g de Potasio, por lo tanto, el detector HPGe empleado es capaz de cuantificar potasio de forma precisa y confiable, ya que su porcentaje de error es de 0.010%.

$$\%E = \left| \frac{192.263 - 192.282}{192.263} \right| \times 100 = 0.010\%$$

-Concentración porcentual de potasio en la muestra Aguacate Hass Michoacán

Una vez que se calculó la actividad específica de la muestra (A_{AHM}) y del potasio elemental (A_K), se puede determinar el porcentaje de potasio en la muestra de interés con la ecuación 6, obteniendo un valor de 0.256% en la muestra de aguacate.

$$\%K = \frac{A_{AHM}}{A_K} \times 100$$

$$\%K = \frac{0.080 \text{ Bq/g}}{31.206 \text{ Bq/g}} \times 100 = 0.256\%$$

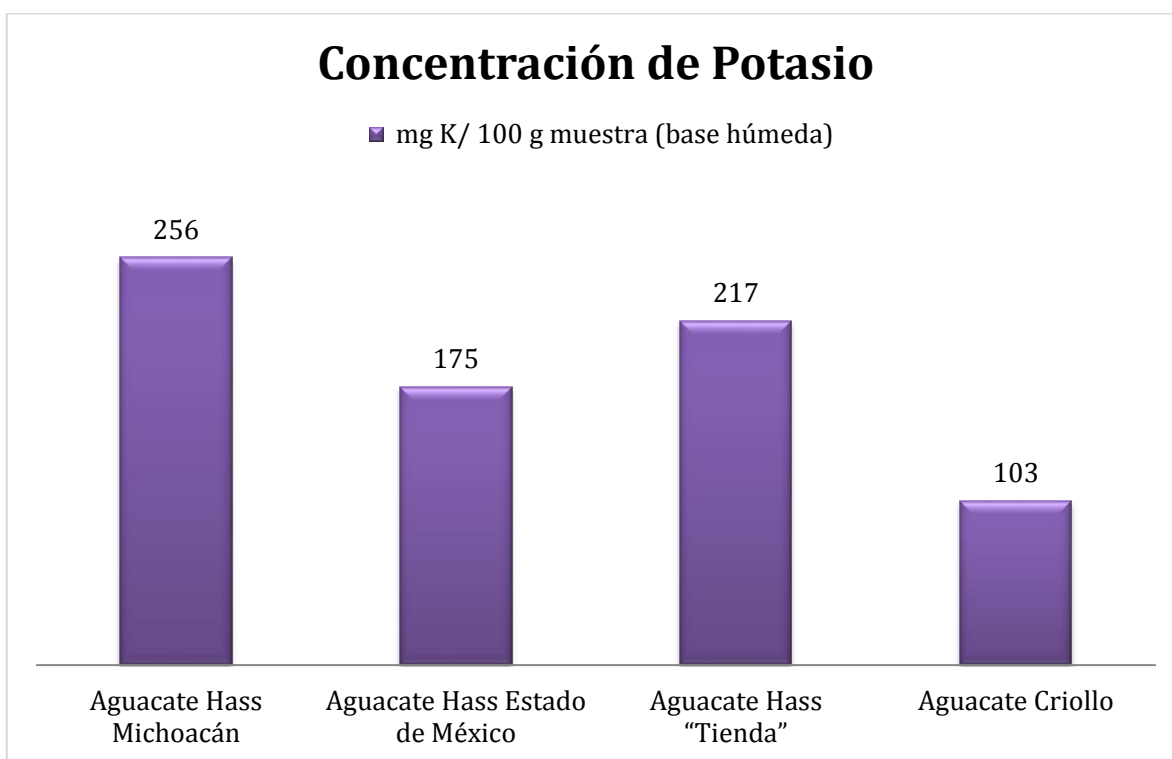
-Concentración de potasio (mg) en 100 g de Aguacate Hass Michoacán en base húmeda

A partir del porcentaje de potasio, por conversión de unidades (ecuación 7), se obtienen valores en mg de Potasio por cada 100 g de aguacate. En la **Tabla 5.9**, se muestran los datos calculados, así como el contenido de potasio de todas las muestras analizadas en este trabajo, y en la **Gráfica 5.6**, se hace una comparación del contenido de potasio total entre muestras.

$$\frac{0.256 \text{ g K}}{100 \text{ g AHM}} \times \frac{1000 \text{ mg K}}{1 \text{ g K}} = 256 \text{ mg K} / 100 \text{ g AHM}$$

Tabla 5.9. Contenido de potasio total en las muestras analizadas

Muestra	Clave	Masa de la muestra	Área Neta Ajustada	Actividad específica de la muestra (Bq/g)	Actividad específica de la muestra (Bq/kg)	% Potasio (g de K/ 100 g de muestra)	mg de Potasio / 100 g de muestra (base húmeda)
Variedad Hass							
1	AHM	700 ± 0.1	1467 ± 181	0.080	79.923	0.256	256
2	AHEM		1002 ± 182	0.055	54.589	0.175	175
3	AHT		1240 ± 177	0.068	67.556	0.217	217
Variedad Criollo							
4	AC	700 ± 0.1	592 ± 176	0.032	32.252	0.103	103
Pagua							
5	AP	700 ± 0.1	-731 ± 192	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia



Gráfica 5.6. Comparación del contenido de potasio de las muestras analizadas

5.5. Discusión

➤ Calibración de energía

Para la calibración del sistema se utilizaron fuentes radiactivas con energías bien definidas: ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co y ^{40}K , con el fin de cubrir un rango de energía amplio para la medición y con una separación energética considerable entre cada radioisótopo. El ^{60}Co decae por emisión gamma a ^{60}Ni y emite dos energías de radiación gamma, por lo que con una sola fuente radioactiva se obtienen dos puntos en la escala de energías del espectro (Villarreal, 2017).

Los espectros obtenidos del detector, son histogramas que representan las cuentas o desintegraciones registradas en el tiempo de análisis (86,400 s), proveniente de los radioisótopos de la muestra en cuestión. El analizador multicanal proporciona dichos histogramas con unidades en número de cuentas frente a canal, por lo tanto, es necesario encontrar la relación existente entre canales y energía para la correcta caracterización de las muestras, por eso se realiza un ajuste lineal (canal-energía).

➤ Espectro de Fondo

En el espectro de fondo, se registró la radiación gamma propia del ambiente, como la radiación cósmica, terrestre, del equipo de trabajo, del laboratorio, el radón, entre otros. Esta radiación puede variar respecto al lugar en donde se realice el análisis, por lo que es necesario determinarla cada vez que se modifique o cambie el lugar de experimentación.

Se encontraron 18 fotopicos que corresponden a plomo, actinio, talio y bismuto, en todas sus energías de emisión. Estos radioisótopos provienen de las cadenas naturales de decaimiento radiactivo de Torio-232, Uranio-235 y Uranio-238. Otro radioisótopo presente en el fondo es ^{40}K , el más abundante en la corteza terrestre.

➤ Espectro de muestras

Los espectros de cada muestra, se compararon fotopico a fotopico con el fondo, con el fin de conocer la radiación proveniente únicamente del alimento analizado. La presencia del radioisótopo en la muestra, se define de acuerdo al valor de incertidumbre asociada: si es

menor al área neta ajustada, significa presencia; si es mayor, se considera dentro de incertidumbre; y si el valor de área neta ajustada es negativo, el radioisótopo se encuentra ausente en la muestra.

Se analizaron tres muestras de aguacate Hass: dos de ellas provienen del estado de Michoacán (adquiridas en la Central de Abasto y en una tienda de autoservicio), y la última pertenece al Estado de México. También se analizó una muestra de aguacate Criollo, perteneciente al Estado de México; y por último, una muestra de Pagua del estado de Nayarit. Es importante resaltar que esta última especie *Persea schiedeana*, es diferente del aguacate (*Persea americana*), pero pertenecen al mismo género y poseen características morfológicas muy similares, por lo que también se le considera como un aguacate.

De forma general, en las tablas de resultados se presentan los radioisótopos detectados en los espectros, la energía que les corresponde, área neta de fotopicos de la muestra y fondo, así como área neta ajustada con incertidumbre. En la última columna, se determina si el radioisótopo está presente, ausente o se encuentra dentro de incertidumbre del equipo. En las gráficas, se relaciona energía (keV) y cuentas por tiempo de cada aguacate analizado, haciendo una comparación con el fondo.

De las Tablas 5.3 a 5.7, se observa el contenido radiológico detectado del aguacate Hass, Criollo y Pagua, notando ausencia de radioisótopos artificiales y naturales.

En todas las muestras, se determinó ausencia de material radiactivo artificial. Los eventos más significativos que causaron la introducción de estos radioisótopos artificiales al medio ambiente como ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr y ^{131}I , fueron las pruebas de bombas atómicas en la tierra (año 1950-1960), el accidente de Chernobyl (1986) y el accidente de Fukushima (2011), con lo cual se incrementó el riesgo para la salud y en su momento, el mercado internacional de alimentos se vio afectado.

El contenido radiológico de origen natural, también está ausente en las muestras o se encuentra dentro de la incertidumbre asociada al fotopico. Los radioisótopos con resultado “DDI”, provienen de las cadenas de desintegración de Torio-232, Uranio-235 y Uranio-238. Este contenido radiológico natural, como isótopos de plomo y radón, representan la fuente

más importante de radiación en la Tierra, se encuentran presentes en bajas concentraciones en suelo, agua, aire y alimentos (Darko *et al.*, 2015).

Estos elementos radiactivos, tanto naturales como artificiales, se concentran principalmente en las capas superficiales del suelo, las plantas asimilan las sustancias radiactivas con otras necesarias para su crecimiento, por lo que pueden penetrar en los tejidos animales y finalmente, fungir como alimento de consumo humano. De acuerdo a los resultados obtenidos, los aguacates analizados son seguros y aptos para consumo humano, en cuanto a contenido radiológico.

Tras el análisis de espectros, el ^{40}K fue el único presente en todas las muestras a excepción del Pagua. El potasio natural es abundante en suelos y agua; en circunstancias normales, la mayor fuente de radiación en alimentos y bebidas por su origen natural, proviene de ^{40}K pero los niveles se mantienen estables, sin llegar a concentraciones muy elevadas (Alonso, 2015).

En las Gráficas 5.1 a 5.4, se corrobora la presencia del fotopico de ^{40}K en energía 1460 keV, que es la energía de emisión de este elemento radiactivo. Se puede observar que el pico de la muestra (color rojo) sobresale del fondo (color azul). La Gráfica 5.5, corresponde al espectro del aguacate Pagua, observando que este pico no sobresale.

Ante la presencia de ^{40}K , es necesario calcular la actividad específica o concentración del radioisótopo en unidades de Bq/kg de alimento. El procedimiento para hacer estos cálculos, se describe en el anexo A.2, bajo las especificaciones del IAEA (1989). Con base en la eficiencia de conteo de un estándar de potasio (Padilla, 2013), se determinó la actividad específica de ^{40}K y fue posible obtener la concentración de potasio total en cada muestra, para compararla con los niveles encontrados en la literatura.

El análisis por espectrometría gamma de las concentraciones de potasio total presente de forma natural, puede aplicarse a otras matrices alimentarias o a cualquier otro nutrimento que pueda presentar radiación gamma o pueda ser marcado radiactivamente.

La actividad de potasio-40, se encuentra en unidades de actividad (Bq/kg), pero no se considera dentro de la normatividad aplicable sobre límites de radioisótopos en alimentos, al ser de baja severidad. La concentración de potasio total se representa en mg potasio/100 g

muestra, el cual se observa en la Tabla 5.9, siendo el aguacate Hass de Michoacán el de mayor valor con 256.1 mg/100 g y el aguacate Criollo el de menor valor con 103.35 mg/ 100g. Comparando con el valor encontrado en la literatura de 507 g potasio/100 g aguacate, establecido por Ezzeddine (2018) y por la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), se obtuvieron valores inferiores a los reportados.

En la Gráfica 5.6, se observa la variación del contenido de potasio en las muestras, que puede deberse a diferentes condiciones ambientales, prácticas agrícolas y otros factores que afectan la transferencia de elementos del ambiente a cultivos, como la concentración disponible de elementos químicos (Nitrógeno, Potasio, Magnesio) del suelo en el que se cultivaron, temperatura, pH o el estado hídrico del suelo y árbol, los cuales cambian de un lugar a otro. La variación del contenido de potasio, también se puede atribuir a los fertilizantes potásicos, residuos de plaguicidas o agua contaminada, que pudieran haber sido agregados a las tierras productoras de aguacate. Por lo tanto, podría suponerse que la concentración de potasio tiene una relación con la ubicación de donde provienen las muestras (CEDRSSA, 2018).

En cuanto a la legislación mexicana, existió la *NOM-088-SSA1-1994, Bienes y servicios. Contaminación por radionúclidos en alimentos de consumo masivo importados. Límites máximos permisibles*, publicada el 28 de junio de 1995 y cancelada el 17 de diciembre de 2004 porque los límites establecidos eran más restrictivos que en las normas internacionales. Se planteó que, en caso de sospecha de contaminación de alimentos con radionúclidos, los valores establecidos internacionalmente, son adecuados para aplicarlos en caso de emergencia. Por lo tanto, en México no se cuenta con las especificaciones de contaminación suficientes, para garantizar la seguridad radiológica de alimentos de consumo y comercio nacional e internacional.

Las autoridades nacionales e internacionales necesitan depositar mayor interés en este tipo de contaminación, debido al incremento en el uso de energía nuclear por su aporte en diferentes áreas en todo el mundo. No hay que perder de vista el riesgo que esto conlleva, pues la importancia que se le da a este tipo de contaminación es poca, ya que sólo se han planteado medidas posteriores a algún accidente o emergencia, y no se han creado medidas preventivas.

5.6. Conclusiones

Se detectó ausencia de radioisótopos artificiales de interés como ^{131}I , ^{90}Sr , ^{137}Cs y ^{134}Cs , mientras que los radioisótopos de origen natural se encuentran dentro de incertidumbre o ausentes, a excepción del radioisótopo ^{40}K que se encontró en todas las muestras menos en Pagua. Por lo tanto, todas las muestras de aguacate son seguras y aptas para consumo humano en cuanto a contenido radiológico, por lo que no representan un riesgo alimentario.

Bajo las recomendaciones del Programa de Asociación FAO/IAEA, las muestras seleccionadas se analizaron con ayuda de un detector de Germanio Hiperpuro, asociado a un analizador de 16,000 canales, que junto con el programa MAESTRO-32 v6 ORTEC®, permiten la medición de radioisótopos emisores de fotones gamma entre energías de 0-2.5 MeV.

El método de espectrometría gamma es una técnica nuclear adecuada, precisa, no destructiva, confiable, en la que la muestra no requiere de tratamiento fisicoquímico y es reproducible para el análisis de diversas matrices alimentarias.

Se encontró la presencia de potasio 40 en la variedad Hass y Criollo, en Pagua está ausente. A partir de este radioisótopo, se determinó el contenido de potasio total en la pulpa de aguacate (para 100 g de muestra): para Hass de Michoacán se obtuvieron 256.1 mg de potasio total, para Hass del Estado de México fueron 174.9 mg, 216.5 mg para aguacate Hass adquirido en tienda de autoservicio y 103.4 mg para aguacate Criollo. La presencia de esta variabilidad, puede deberse a la procedencia o a las diferentes condiciones de cultivo del aguacate analizado.

Este trabajo puede ser la base para crear protocolos estandarizados, mejorar o enriquecer las normas aplicables a la medición de contaminantes radiológicos y para el análisis o certificación de productos que participen en el comercio exterior.

5.7. Recomendaciones

Este trabajo aporta una metodología para la identificación y determinación de radioisótopos en alimentos, mediante espectrometría gamma, ya que actualmente no existen normas nacionales que establezcan límites máximos de contaminantes radiológicos.

Es posible implementar el análisis de contaminantes radiológicos en laboratorios de la Facultad de Química de la UNAM, para asegurar el cumplimiento de la reglamentación pertinente del país, o bien, ocuparse en caso de emergencia nuclear, tomando en cuenta que el costo y mantenimiento del equipo de detección, puede ser una limitante.

Con la información recabada en este trabajo y anteriores, es posible crear un atlas sobre la distribución de contaminantes radiológicos de diversos alimentos a nivel nacional.

Para garantizar la seguridad radiológica de alimentos de consumo nacional, se recomienda realizar estas pruebas cada 5 años o en caso de una emergencia nuclear en el mundo.

Anexos

A.1. Unidades de radiactividad

La radiación conlleva energía. En el Sistema Internacional, la unidad de energía es el Joule (J), pero en física de radiaciones la unidad más empleada es el electrón-volt (eV), definido como la energía que adquiere una partícula con una carga electrónica ($e=1.602 \times 10^{-19}$ Coulombs), en una diferencia de potencial de 1 volt. En la **Tabla A1**, se muestran las unidades más utilizadas (Aguilera *et al.*, 2001):

Tabla A1. Unidades de energía

Unidades	Equivalencia
1 eV	1.602×10^{-19} J
1 keV	10^3 eV
1 MeV	10^6 eV
1 GeV	10^9 eV

Para caracterizar de forma cuantitativa y precisa las radiaciones ionizantes y su posible efecto, se dispuso de un conjunto de magnitudes con sus correspondientes unidades. A continuación, se presentan algunas de ellas:

Dosis efectiva

Se puede definir también “dosis de radiación” o “dosis”, es la medida de la energía depositada en un tejido u órgano, por lo tanto, mide el daño biológico que se puede causar. La aparición de efectos estocásticos depende del tipo de radiación y del órgano considerado, ya que no todos son igualmente radiosensibles. Esta magnitud toma en cuenta la combinación de diferentes dosis en diferentes órganos como consecuencia de una irradiación del cuerpo entero. Se define en sievert, pero al ser una unidad grande, es común hablar en términos de fracciones de sievert como (IAEA-TECDOC, 2016):

$$\begin{aligned} 1 \text{ sievert} &= 1000 \text{ milisievert (mSv)} \\ &= 1\,000\,000 \text{ microsievert (\mu Sv)} \end{aligned}$$

Exposición a la radiación

Es una magnitud definida para medir la cantidad de carga total de todos los iones, exclusivamente de un haz o campo de fotones (radiación X o gamma), producidos en un medio específico que es el aire (ionización del aire). La unidad utilizada en el Sistema Internacional es el culombio por kilogramo (C/kg), la unidad antigua es el roentgen (R), por lo que su equivalencia es $1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$ (CSN, 2009).

Dosis absorbida

La dosis absorbida en un material dado, es una magnitud dosimétrica que no toma en cuenta posibles efectos biológicos, válida para cualquier tipo de radiación, especificando el material al que se cede la energía impartida por la radiación. Es decir, representa la energía neta que “se queda” en el volumen de materia considerado. Se denominan en gray (Gy) o en julio/kilogramo ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$); la unidad antigua es el rad (equivalente a 1 cGy o 10^{-2} J/kg).

Equivalente de dosis en un punto

Esta magnitud se introdujo para cuantificar la mayor o menor eficacia biológica en un punto de un órgano o tejido, de las partículas cargadas generadas en el proceso de absorción de energía, de los diferentes tipos de radiación ionizante en niveles bajos de exposición. Se refleja la efectividad observada de las diferentes radiaciones, para causar efectos en la salud y se define en J/kg, su nombre especial es sievert (Sv) (CSN, 2009).

Dosis equivalente en un órgano

Se miden los posibles efectos estocásticos sobre la salud, debido a las radiaciones, depende de la dosis absorbida (energía depositada por unidad de masa), tipo y energía de la radiación considerada. La unidad utilizada es sievert (Sv).

A.2. Cálculos para determinar potasio total en una muestra de interés

Para conocer el contenido total de potasio en una muestra, se requiere evaluar la eficiencia de conteo del equipo de detección. Por esta razón, se debe colocar un estándar de concentración bien definida en el detector, para cuantificar las interacciones de la radiación gamma generadas del decaimiento de los núcleos de ^{40}K a ^{40}Ar con el detector HPGe, lo que a su vez indicará el contenido total de potasio de la muestra de interés.

Para fines de esta tesis, se tomó de referencia el trabajo de Padilla (2013), donde se coloca un estándar de KCl.

- **Estándar de Potasio**

Para determinar la eficiencia de conteo del equipo de detección, es necesario calcular el contenido de potasio presente en el estándar utilizado (366.600 g de KCl) con la ecuación 1. Con los pesos moleculares de K y KCl, se determina que 192.263 g de la masa total del estándar de KCl, corresponderían a potasio teóricamente.

Ecuación 1

$$366.600g \text{ KCl} \times \frac{1 \text{ mol KCl}}{74.551 \text{ g de KCl}} \times \frac{1 \text{ mol K}}{1 \text{ mol KCl}} \times \frac{39.098 \text{ g de K}}{1 \text{ mol de K}} = 192.263 \text{ g de K}$$

- **Actividad específica**

La actividad específica de un radioisótopo dado, se define como la actividad por unidad de masa del elemento. La actividad es el número de desintegraciones por segundo de los núcleos radiactivos y de acuerdo al Sistema Internacional, la unidad para designar la actividad es el Becquerel (Bq). Por lo tanto, la unidad de la actividad específica de un radioisótopo es Bq/g o Bq/mmol.

Este valor no se determina directamente, sino que se calcula a partir de una solución patrón que contenga el radioisótopo del cual se quiere calcular la actividad específica (WHO, 2008).

Para calcular el contenido de potasio total en las muestras, es necesario calcular la actividad específica (teórica) del ^{40}K , sabiendo que la abundancia isotópica natural de ^{40}K radiactivo es

de 0.0118% de potasio total. El equipo empleado sólo detecta una fracción de la radiación total emitida, expresada en cuentas de área neta; mediante un cálculo (ecuación 2) se puede obtener la actividad específica de algún isótopo radiactivo presente en el elemento.

Ecuación 2

$$A_K = \frac{N_A * a * \ln 2}{100 * MW * T_{1/2}} = \frac{Bq}{g \text{ de } K}$$

Donde:

A_K = Actividad específica de potasio (A_K)

N_A = Constante del número de Avogadro ($6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

a = Abundancia isotópica de ^{40}K (0.0118%)

MW = Peso molecular de Potasio (39.098 g/mol)

$T_{1/2}$ = Vida media de ^{40}K ($4.037 \times 10^{16} \text{ s}$)

- **Eficiencia de conteo del equipo (E_f)**

La eficiencia del detector indica qué fracción de desintegraciones totales es reconocida por el detector. Es un parámetro importante en la medición de cualquier detector, ya que se podrá relacionar la actividad medida con la actividad real de la muestra. Para calcular este valor, se debe obtener la masa del estándar utilizado. La ecuación de la eficiencia de detección en porcentajes es la siguiente:

Ecuación 3

$$\%E_f = \frac{A_{\text{neto estándar}} - A_{\text{neto fondo}}}{A_K * A_\gamma * m_K * t_a}$$

Donde:

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

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

A_Y = % de radiación gamma de decaimiento de ^{40}K a ^{40}Ar (0.118%)

m_K = Masa de potasio en el estándar (192.263 g)

t_a = Tiempo de análisis (86,400 s)

Este parámetro está dado por la diferencia entre el área neta del estándar y fondo, obtenidas en una energía de 1460 keV; el porcentaje de radiación gamma de ^{40}Ar es 0.118%, que es el radioisótopo producido por el decaimiento de ^{40}K .

De acuerdo a Padilla (2013), el estándar que se utilizó para evaluar la eficiencia de conteo fue KCl en polvo. Se analizaron 366.600 g de KCl, de los cuales 192.263 g corresponden a K. Al ser analizado en el detector de HPGe, mediante espectrometría gamma por 86,400 s, se obtuvieron las cuentas de área neta de ^{40}K : 162057 ± 452 , comparado con un fondo de área neta de ^{40}K : 4395 ± 145 .

- **Actividad específica de ^{40}K en la muestra (A_S)**

La actividad específica de ^{40}K de una muestra en particular, se obtiene de la ecuación 4, siendo este valor proporcional al contenido de potasio total de la muestra en cuestión. Se requiere calcular la eficiencia de detección del equipo y del análisis de cada espectro de las muestras, que se realizaron mediante espectrometría gamma.

Ecuación 4

$$A_S = \frac{A_{na}/t_a}{m_{mu} * E_f * A_Y}$$

A_{na} = Área neta ajustada del ^{40}K dependiendo cada espectro de la muestra

m_{mu} = Masa muestra (700 g)

E_f = Eficiencia del detector (no porcentual)

A_Y = % de radiación gamma de decaimiento de ^{40}K a ^{40}Ar (0.118%)

t_a = Tiempo de análisis (86,400 s)

- **Contenido total de potasio en cada muestra**

Se relaciona la actividad específica de ^{40}K elemental o teórica (A_K) con la actividad específica del mismo radioisótopo registrado en la muestra de interés (A_{SK}), como se ejemplifica en la ecuación 5:

Ecuación 5

$$m_K = \frac{A_{SK}}{A_K} \times m_{KCl}$$

$$m_K = \frac{16.367 \text{ Bq/g}}{31.206 \text{ Bq/g}} \times 366.600 \text{ g KCl} = 192.282 \text{ g K}$$

Al dividir la actividad de las muestras entre la actividad específica de potasio, se obtienen los gramos de potasio por gramo de muestra; si se multiplica este valor por 100, se obtiene la concentración de potasio en porcentaje:

Ecuación 6

$$\%K = \frac{A_{SK}}{A_K} \times 100 = \frac{\text{g Potasio total}}{100\text{g muestra}}$$

Para reportar el contenido de potasio en mg de K/ 100 g muestra, se ocupa la siguiente ecuación:

Ecuación 7

$$\frac{\% \text{ de K}}{100\text{g muestra}} \times \frac{1000 \text{ mg de K}}{1 \text{ g de K}} = \frac{\text{mg de K}}{100\text{g muestra}}$$

Glosario

Actividad: Número de desintegraciones por segundo dentro de los núcleos radiactivos por unidad de tiempo (NOM-003-NUCL-1994).

Baya: Fruto carnoso con varias semillas en su interior, envuelta directamente por la pulpa (Barrientos *et al.*, 1996).

Climatérica: Las frutas climatéricas son aquellos que pueden madurar después de la cosecha. Hay un incremento del ritmo respiratorio y en niveles de etileno (hormona que controla proceso de maduración y senescencia o envejecimiento de las frutas) (FAO, 2007).

Contaminante: "Cualquier sustancia no añadida intencionalmente al alimento, que está presente en dicho alimento como resultado de la producción (incluidas las operaciones realizadas en agricultura, zootecnia y medicina veterinaria), fabricación, elaboración, preparación, tratamiento, envasado, empaquetado, transporte o almacenamiento de dicho alimento o como resultado de contaminación ambiental. Este término no abarca fragmentos de insectos, pelo de roedores y otras materias extrañas" (CODEX STAN 193-1995).

Dosimetría: Trata con magnitudes relacionadas con la medida de la energía absorbida y de su distribución. Se concibe como una medida física que se correlaciona con los efectos reales o potenciales de la radiación (CSN, 2009).

Drupa: Fruto carnoso que tiene en su interior una única semilla, envuelta en una capa dura o hueso (Barrientos *et al.*, 1996).

Eficiencia: Relación entre pulsos y número dado de emisiones gamma (Rangel, 2017).

Espectro: Distribución de energía de las fuentes de radiación gamma emitidas por una muestra (Rangel, 2017).

Estocástico: Efecto que tiene lugar, tras la exposición a dosis bajas de radiación y la probabilidad de que ocurra, pero no su gravedad, aumenta al aumentar la dosis de radiación recibida (Espinosa García, 2013).

eV: Unidad de medición de energía proveniente de fuentes radiactivas. Es la abreviación de electrón volt (Rangel, 2017).

Fotón: Partícula mínima de energía electromagnética que se produce, se transmite y absorbe (Calzada y Cerecetto, 2019).

Fotopico: Función gaussiana de un espectro, que es producida por las interacciones radiactivas de energía con los materiales del detector (Rangel, 2017).

Oscurecimiento enzimático: Oxidación de compuestos fenólicos naturalmente presentes en el alimento. Es una reacción catalizada por la enzima polifenol oxidasa en presencia de oxígeno, produciendo quinonas que eventualmente se polimerizan para formar melaninas, que son los pigmentos oscuros, responsables de los cambios de coloración en el alimento (Meza *et al.*, 2007).

Radiactividad: Propiedad de ciertos radionúclidos de emitir radiación, mediante la transformación espontánea de sus núcleos en otros (López & Iturbe, 2004).

Radioquímica: Rama de la Química, que estudia las reacciones químicas mediante técnicas basadas en la radiactividad, utilizando elementos radiactivos para determinar mecanismos de reacción (IAEA, 1989).

Radiotoxicidad: Capacidad que tiene un radionúclido para producir una lesión en virtud de sus emisiones radiactivas, cuando es incorporado al cuerpo (NOM-003-NUCL-1994).

Voltaje: Presión que ejerce una fuente de suministro de energía eléctrica sobre un circuito, para que se establezca un flujo de corriente eléctrica (Hernández, 2016).

Abreviaturas

HDL lipoproteínas de alta densidad

LDL lipoproteínas de baja densidad

MCA Analizador Multicanal

MeV Megaelectronvoltio

UNSCEAR Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas

IAEA Organismo Internacional de Energía Atómica

CODEX Comisión del *Codex Alimentarius* Programa conjunto FAO/OMS sobre Normas Alimentarias.

EURATOM Comunidad Europea de la Energía Atómica

Referencias

- Abdulwahab, A., 2016. Interaction of Radiation with matter. *Nuclear Physics*, Capítulo 4: 50-56, University Al- Mustansiriya, Bagdad.
- Aguilera, E., Chávez, E. y Hess, P., 2001. Escuela Mexicana de Física Nuclear. [En línea] Disponible en: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/33/035/33035593.pdf> [Último acceso 10 de septiembre de 2020]
- Aguirre, J., 2003. Control Radiológico de Productos Alimenticios de Importación. *Energía Nuclear y Seguridad Radiológica: Nuevos Retos y Perspectivas XIV Congreso Anual de la SNM/XXI Reunión Anual de la SMSR*. [En línea] (Actualizado 10-13 de septiembre). Disponible en: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/37/009/37009823.pdf> [Último acceso 15 de febrero de 2020]
- Alonso, J. 2015. Radioactividad en hongos (II): El radionucleido natural 40K (Potasio-40) en Galicia. *Tarrelas (Revista de la Federación Galega de Micología)*, 17: 4-12.
- Baratta, E., 1994. *Manual of food quality control radionuclides in food*. Food and Drug Administration, Roma.
- Barrera, M. et al., 2008. *Puesta a Punto de un Sistema de Espectrometría Gamma para la Determinación de Cs-137 en Suelos Españoles*. Madrid: CIEMAT. [En línea] Disponible en: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/40/018/40018273.pdf?r=1&r=1> [Último acceso 22 de septiembre de 2020].
- Barrientos, A., García, E., Avitia, E., 1996. Anatomía del fruto de aguacate, ¿drupa o baya? *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 2(2): 189-198.
- Bernal, J., Díaz, C., Osorio, C., Tamayo, A., Osorio, W., Córdoba, O., et al. Corpoica, 2014. Actualización tecnológica y Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) en el cultivo de aguacate. Medellín (Colombia). *CORPOICA*. República de Colombia. Capítulo 1, 11-151.
- Brandhoff, P., Van Bourgondiën, M., Onstenk, C., Vos van Avezathe, A., & Peters, R., 2016. Operation and performance of a National Monitoring Network for Radioactivity in Food. *Food Control*, 64: 87–97.
- Calzada, V. y Cerecetto, H., 2019. Una introducción a la Química Nuclear. Comisión sectorial de Enseñanza: Universidad de la República, Montevideo.
- CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Energies Alternatives), 2005. *Radioactivity*. Communication Division Bâtiment Siège.
- Ceballos, A. y Montoya, S., 2013. Evaluación química de la fibra en semilla, pulpa y cáscara de tres variedades de aguacate. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(1): 103-112.
- CEDRSSA (Centro de Estudios para el Desarrollo, 2017. *Caso de Exportación: El Aguacate*. Palacio Legislativo de San Lázaro, Ciudad de México.

-CEDRSSA, 2018. *Fertilizantes químicos y biofertilizantes en México*. Palacio Legislativo de San Lázaro, Ciudad de México.

-Ciocci, L. y Acuña, G., 2001. Estudio de la estadística del decaimiento radiactivo. [En línea] Disponible en:

http://users.df.uba.ar/sgil/labo5_uba/inform/info/pautadas/estadistica_decaimiento_ligia.pdf

[Último acceso 15 de abril de 2020]

-CODEX STAN 193-1995. Norma General del Codex para los Contaminantes y las Toxinas presentes en los alimentos y piensos.

-Cornejo Díaz, N. A., 2009. *Desarrollo de un código de simulación por Monte Carlo para la calibración de sistemas de detección en espectrometría de radiación gamma*, Universidad de Extremadura, Badajoz (Tesis).

-Cruz, J., Del Ángel, O., De La Cruz, J., Joaquín, M., 2007. Características morfológicas y bioquímicas de frutos de chinene (*Persea schiedeana* Nees). *Revista Chapingo Serie Horticultura*,13(2): 141-147.

-CSN, 2009. *Magnitudes y unidades radiológicas*. [En línea] Disponible en: http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/624874014_241120091324.pdf consultado 15/09/20 [Último acceso 15 de septiembre de 2020]

-CSN, 2010. *Dosis de radiación*. [En línea] Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/914805/Dosis%20de%20radiaci%C3%B3n> [Último acceso 15 de marzo de 2020]

-DANE, 2015. *El cultivo del aguacate (Persea americana Miller.), fruta de extraordinarias propiedades alimenticias, curativas e industriales* (Primera parte). Boletín mensual Insumos y factores asociados a la producción agropecuaria, Número 40, Colombia.

-Darko, G., Faanu, A., Akoto, O., Acheampong, A., Goode, E. J., & Gyamfi, O., 2015. *Distribution of natural and artificial radioactivity in soils, water and tuber crops*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(6).

-Del Angel, O., Cruz, J., De la Cruz, J., Famiani, F., 2010. Ripening and physiological changes in the fruit of *Persea schiedeana* Nees during the postharvest period. *HortScience*, 45(1): 172-175.

-Dinh, N., Dulinski, M., Jodlowski, P., Nowak, J., Rozanski, K., Sleziak, M. y Wachniew, P., 2011. Natural radioactivity in groundwater a review. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 47(4): 415–437.

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

-Espinosa Muñiz, J. C., 2013. *Estudio de contaminantes radiológicos en cereales y leguminosas mediante técnicas nucleares*, UNAM, Ciudad de México (Tesis).

- Ezzeddine, K., 2017. *Antioxidantes en el aguacate*. Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad de La Laguna [En línea]. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/9548/Antioxidantes%20en%20el%20Aguacate.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Último acceso 15 de febrero de 2020]
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2007. Manual de manejo postcosecha de frutas tropicales (papaya, piña, plátano, cítricos).
- FAOSTAT, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> [Último acceso 3 de febrero de 2020]
- FDA, 2005. Guidance Levels for Radionuclides in Domestic and Imported Foods. EUA.
- 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*, UNAM, Ciudad de México (Tesis).
- Gómez, V., 2002. Inhibition of surface browning, cut avocado. *Journal of Food Quality, Food & Nutrition Press, Inc.*, Connecticut, 25: 369-379.
- González, G. y Rabin, C., 2011. *Para entender las radiaciones*. DIRAC- Facultad de Ciencias, Uruguay.
- Gutiérrez Zavala, D., 2018. *Análisis de contaminantes radiológicos y contenido de potasio en hortalizas (tomate veder y pimiento morrón), por métodos nucleares*, UNAM, Ciudad de México (Tesis).
- Hernández, F. 2016. *Voltaje, corriente y potencia eléctrica*. Secretaría de Educación Pública, Ciudad de México.
- 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*, UNAM, Ciudad de México (Tesis).
- IAEA, 1989. *Measurement of radionuclides in food and the environment*. [En línea] Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/trs295_web.pdf [Último acceso 12 de junio de 2020]
- IAEA, 2002. *Natural and induced radioactivity in food*. [En línea] Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1287_prn.pdf [Último acceso 12 de junio de 2020]
- IAEA, 2012. *Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*, McGill University, Montreal.
- IAEA-TECDOC (División Conjunta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en Alimentación y Agricultura, Agencia Internacional de Energía Atómica), 2016. *Criteria for Radionuclide Activity Concentrations for Food and Drinking Water*, Vienna.
- INFOSAN (International Food Safety Authorities Network), 2011. *Nuclear accidents and radioactive contamination of foods*, WHO/FAO. [En línea]

Disponible

en:http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/agns/pdf/nuclear_accidents_radioactive_contamination_foods.pdf [Último acceso 19 de septiembre de 2020]

-KOLLER, O., 1992. *Abacaticultura*. Porto Alegre: UFRGS.

-López, B. & Iturbe, J., 2004. *Radiactividad natural y artificial en nuestro entorno*. [En línea] Disponible en: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_2/radiactividad_nuclear.pdf [Último acceso 8 de abril de 2020]

-Loria, L., *et. al.* 1992. Cuantificación de la concentración de elementos naturales y contaminantes radiactivos emisores gamma en suelos de la península de Nicoya, Guanacaste, utilizando la técnica de conteo de bajo nivel. *Tecnología en marcha*, 11(4).

-Meroli, S., 2015. Interaction of radiation with matter: from the theory to the measurements. [En línea] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/283855144_Interaction_of_radiation_with_matter_from_the_theory_to_the_measurements [Último acceso 7 de abril de 2020]

-Meza, J., Lozano, P., Esparza, J. y Meza, F. 2007. Inhibición del oscurecimiento enzimático y cambios texturales en manzana Golden Delicious tratada con jugo de piña. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 5(1): 1-7.

-Miranda, J. 2000. *Evaluación de la Incertidumbre en Datos Experimentales*, Instituto de Física, UNAM, México.

-Monografía de cultivos, 2011. *Aguacate*. Subsecretaria de Fomento de Agronegocios. Ciudad de México.

-Morata, G., 2016. Determinación de aerosoles radiactivos con muestreadores de bajo caudal. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/98290/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Último acceso 3 de septiembre de 2020].

-NIH (National Institutes of Health), 2019. (Última actualización 5 de marzo de 2019) [En línea] Disponible en: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Potassium-DatosEnEspanol/> [Último acceso 1 de octubre de 2020]

-Norma Oficial Mexicana NOM-088-SS1-1994, Bienes y servicios. Contaminación por radionúclidos en alimentos de consumo masivo importados. Límites máximos permisibles

-Norma Oficial Mexicana NOM-003-NUCL-1994, Clasificación de instalaciones o laboratorios que utilizan fuentes abiertas.

-OMS (Organización Mundial de la Salud), 1989. *Niveles de Intervención derivados para radionucleidos en los alimentos*, Ginebra.

- OMS (Organización Mundial de la Salud), 2019. Biblioteca electrónica de documentación científica sobre medidas nutricionales (Última actualización 5 abril de 2019) [En línea] Disponible en: https://www.who.int/elena/titles/potassium_cvd_adults/es/ [Último acceso 1 de octubre de 2020]
- Orihuela Soriano, J., 2017. *Estudio para la reducción de los niveles de fondo en un sistema de espectrometría gamma*, Facultad de Ciencias, UNAM, Ciudad de México (Tesis).
- Ortega, M., 2003. Valor nutrimental de la pulpa fresca de aguacate Hass. Actas V Congreso Mundial del Aguacate. [En línea] Disponible en: http://www.avocadosource.com/WAC5/Papers/WAC5_p741.pdf [Último acceso 25 de febrero de 2020]
- Ortiz, A., Dorantes, L., Galiandez, J., Guzmán, R., 2003. Effect of Different Extraction Methods on Fatty Acids, Volatile Compounds, and Physical and Chemical Properties of Avocado (*Persea americana* Mill.) Oil. *J. Agric. Food Chem.*, 51(8).
- Ortiz, J., 2012. *Simulación numérica de la actividad de las fuentes de Cesio 137, Cobalto 60, Estroncio 90 y Talio 204 como la tasa de dosis para las fuentes emisoras de radiación Gamma*, Instituto Pedagógico de Barquisimeto. [En línea] Disponible en: <http://files.integraciondesaberes.webnode.com.ve/200000012-22def23d89/decaimiento%20radiactivo%20upel-IPB.pdf> [Último acceso 4 de abril de 2020]
- Padilla Soriano, E., 2013. *Estudio del contenido de potasio en nopal mexicano (*Opuntia ficus indica*), mediante métodos nucleares*, UNAM, Ciudad de México (Tesis).
- Pérez, R., Villanueva, S., Cosío, R., 2005. El aceite de aguacate y sus propiedades nutricionales. *e-Gnosis* [en línea], 3(10).
- Pinilla, C., Ramírez, O., Fajardo, F., 2003. Estudio experimental del decaimiento radioactivo por medio de analogías clásicas. *Revista de Física*, No. 27, Colombia.
- PNUMA, 2016. *Radiación: Efectos y Fuentes*. [En línea] Disponible en: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7790/Radiation_Effects_and_source2_016Radiation_-_Effects_and_Sources_SP.pdg.pdf?sequence=7&isAllowed=y [Último acceso 3 de febrero de 2020]
- Rangel, J. 2017. *Estudio de nuevos detectores para espectrometría de radiación gamma*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.
- Robayo Medina, A. T., 2016. *Caracterización fisicoquímica de diferentes variedades de aguacate, *Persea americana* Mill. (Lauraceae) e implementación de un método de extracción del aceite de aguacate como alternativa de industrialización*, Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Departamento de Química, Bogotá (Tesis).
- Rodríguez, A. y Sánchez, P., 2005. *Especies de frutales cultivadas en Cuba en la Agricultura Urbana*. [En línea] (Actualizado septiembre de 2005). Disponible en: <https://biblioteca.ihatuey.cu/link/libros/agronomia/efcau.pdf> [Último acceso 5 de febrero de 2020]

- Rubí, M., Franco, A., Rebollar, S., Bobadilla, E., Martínez, I., Siles, Y., 2013. Situación actual del cultivo de aguacate (*Persea americana Mill.*) en el Estado de México. *Agroecosistemas tropicales y subtropicales*, 16 (1): 93-101.
- SAGARPA, 2017. *Aguacate Mexicano*, Planeación Agrícola Nacional 2017-2030, Ciudad de México.
- SAGARPA, 2019. *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*, Ciudad de México.
- Sánchez, G., 2005. El uranio, un elemento poco conocido. *Revista SNE*. [En línea] Disponible en: https://gedos.usal.es/bitstream/handle/10366/55606/DEHE_Uranio.pdf;jsessionid=4EC2C65240A0BEBAC4224F4EE0CA02F5?sequence=1 [Último acceso 11 de marzo de 2020]
- Singh, N., 2011. *Radioisotopes: Applications in Physical Sciences*. InTech, Croatia.
- Sprawls, P., 1995. *Physical Principles of Medical Imaging: Interaction of Radiation with Matter*. 2nd ed. Madison: Medical Physics Publishing Corporation.
- Téliz, D., Mora, A. y Morales, L., 2000. Importancia histórica y socioeconómica del aguacate. En: D. Téliz y A. Mora eds. *El aguacate y su manejo integrado*. México: Mundi Prensa.
- UNSCEAR, 2000. *Radiaciones Ionizantes*. [En línea] Disponible en: http://www.ffis.es/ups/ResponsabilidadGrupal/11_Radiaciones_ionizantes.pdf [Último acceso 7 de abril de 2020].
- Urango, L., Montoya, G., Cuadros, M., Henao, D., Zapata, P., López, L., et al., 2009. Efecto de los compuestos bioactivos de algunos alimentos en la salud. *Perspect Nutr Humana*, 11:27-38.
- Vasilyeva, A. y Starkov, O., 2001. Principle of natural and artificial radioactive series equivalency. IAEA, State Scientific Centre Institute of Physics & Power Engineering (IPPE), Obninsk.
- Vilchis Lugo, B., 2016. *Estudio mediante técnicas nucleares, de contaminantes radiológicos en carne de pollo de engorda procesado*, UNAM, Ciudad de México (Tesis).
- Villarreal Noguera, I. del C., 2017. *Estudio de contaminantes radiológicos en productos cárnicos y quesos seleccionados, mediante espectrometría gamma*, UNAM, Ciudad de México (Tesis).
- VKM (Norwegian Scientific Committee for Food Safety), 2017. *Risk assessment of radioactivity in food*. [En línea] Disponible en: <https://vkm.no/download/18.3e36521015e01217dafa9e15/1504112728348/e53db7f962.pdf> [Último acceso 22 de septiembre de 2020].
- WHO (World Health Organization), 2008. Radiopharmaceuticals: Final text for addition to The International Pharmacopoeia. Forty-third WHO Expert Committee on Specifications for Pharmaceutical Preparations.