



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACION  
DE POTASIO EN ALIMENTOS MEDIANTE LA  
DETECCIÓN DE LAS RADIACIONES  
EMITIDAS POR EL  $^{40}\text{K}$ .**

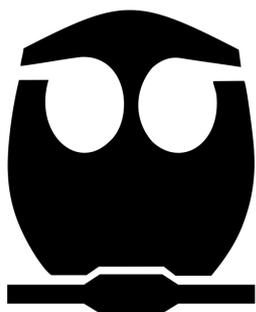
**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :

**QUÍMICO FARMACÉUTICO BIÓLOGO**

P R E S E N T A :

**MARIA DEL PILAR LIZARRAGA RUIZ**



**MEXICO D.F.**

**2006**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO :**

**PRESIDENTE : Prof: ANGELA SOTELO LOPEZ**

**VOCAL : Prof. J. MANUEL NAVARRETE TEJERO**

**SECRETARIO : PEDRO VALLE VEGA**

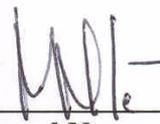
**1<sup>er</sup>. SUPLENTE : FRANCISCA ITURBE CHIÑAS**

**2<sup>o</sup>. SUPLENTE : BERTHA JULIETA SANDOVAL GUILLEN**

**Sitio donde se desarrolló el tema:**

**Facultad de Química .UNAM . Edificio D. Depto. de Química Nuclear.  
Ciudad Universitaria .**

**Asesor :**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Juan Manuel Navarrete Tejero**

**Sustentante :**

  
\_\_\_\_\_  
**Ma. del Pilar Lizárraga Ruiz**

## DEDICATORIA :

Dedico el presente trabajo:

A mis padres:

Ma. Luisa y Enrique con todo mi amor , respeto y admiración.

A mis hermanos:

Mónica , Enrique y Francisco porque siempre estaremos unidos en las buenas y las malas independientemente de las distancias.

A mi esposo David.

Agradezco especialmente:

A Dios

A los profesores de la Facultad de Química por la preparación académica que me han dado.

Al Departamento de Química Inorgánica y Nuclear por su apoyo para la realización de este trabajo.

A mi Asesor Dr. Juan Manuel Navarrete por la oportunidad que me brindó , por su ayuda y confianza.

A la Maestra en Ciencias Angela Sotelo agradezco su paciencia, consejos y enseñanza para la conclusión de este trabajo.

A los miembros del jurado por sus valiosas sugerencias y aportaciones para la finalización de este trabajo.

A todos ustedes : MIL GRACIAS

**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POTASIO EN ALIMENTOS  
MEDIANTE LA DETECCIÓN DE LAS RADIACIONES EMITIDAS POR EL <sup>40</sup>K.**

TEMARIO :	PAGINA
<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Objetivos</b>	2
<b>3. Antecedentes</b>	3
<b>3.1 Generalidades de la Radiactividad</b>	3
3.1.1 Introducción a la Radiactividad	3
3.1.2 Isótopos	3
3.1.3 Radioisótopos	3
3.1.4 Series Radiactivas	3
3.1.5 Radiación ionizante	3
3.1.6 Decaimiento Radiactivo	4
3.1.6.1 Radiación Alfa	4
3.1.6.2 Radiación Beta	4
3.1.6.3 Radiación Gamma	4
3.1.6.4 Captura electrónica	5
3.1.7 Eficiencia en la detección	5
3.1.8 Interacción de la radiación con la materia	5
3.1.9 Ley del Decaimiento Radiactivo y velocidad de desintegración	6
3.1.10 Tiempo de vida media	7
3.1.11 Electrón-volt y factores de conversión	8
3.1.12 Edades Geológicas	8
3.1.13 Unidades de Radiación	9
3.1.14 Aplicaciones de la radiactividad	10
<b>3.2 Efectos nocivos de la radiación en el hombre</b>	13
3.2.1 Clasificación de los materiales radiactivos naturales	13
3.2.2 Clasificación de las Fuentes radiactivas	13
3.2.2.1 Fuentes naturales de radiación	13
3.2.2.2 Fuentes de radiación interna	14
3.2.2.3 Radón	14
3.2.2.4 Alimentos y bebidas	14
3.2.3 Radiación Artificial	16
3.2.3.1 Contaminación por Cesio	16
3.2.4 Efectos biológicos de la radiación	17
<b>3.3 Necesidad de certificar ausencia de contaminación radiactiva en alimentos</b>	19
3.3.1 Irradiación y modificación de la calidad nutritiva	20
3.3.2 Normalización nacional e internacional	20

<b>3.4 Generalidades del potasio como factor alimenticio y su isótopo radiactivo <sup>40</sup>K</b>	24
3.4.1 Generalidades del Potasio	24
3.4.2 Potasio-40	24
3.4.3 Requerimiento diario de potasio	25
3.4.4 Trastornos producidos por falta de potasio	25
3.4.5 Exceso de potasio	25
3.4.6 Efectos terapéuticos del potasio	26
3.4.7 Generalidades del potasio	27
<b>3.5 Descripción y funcionamiento del equipo de detección</b>	
3.5.1 Equipo de detección	28
3.5.2 Fundamento del funcionamiento de las partes del equipo	29
3.5.2.1 Detector de centelleo	29
3.5.2.2 Analizador Multicanal	30
3.5.2.3 Selector	31
3.5.2.4 Descripción del detector de radiación gamma	31
3.5.2.5 Tiempo muerto	32
3.5.2.6 Contenedor Marinelli	33
3.5.2.7 Estadística de resultados	33
<b>4 Desarrollo experimental</b>	
4.1 Diagrama general del estudio	35
4.2 Método	36
4.2.1 Equipo	36
4.2.2 Material	37
4.3 Calibración del Detector de Centelleo Multicanal	37
4.4 Determinación de la radiación de fondo	40
4.5 Muestras estudiadas	42
4.6 Selección de condiciones de determinación	43
4.7 Diagrama de proceso	46
4.8 Cálculos para determinar la actividad del <sup>40</sup> K y conc. Total de K en alimentos	47
4.9 Resultados	49
4.10 Comparación de resultados obtenidos por Espectrometría gamma y los resultados reportados por el INNSZ para los mismos alimentos	56
<b>5 Conclusiones</b>	62
<b>Anexo I :</b> Fotografías del equipo usado en el estudio	63
<b>Anexo II :</b> Certificado del multinuclido usado en la calibración	66
<b>Bibliografía.</b>	67

## INDICE DE TABLAS

	PAGINA
Tabla 1: Factores de Conversión de eV	8
Tabla 2: Algunos núclidos ó isótopos radiactivos ,vidas medias y aplicaciones médicas como marcadores del cuerpo humano	11
Tabla 3: Dosis anual de fuentes naturales en zonas de fondo de radiación normal	15
Tabla 4: Recomendación diaria de Potasio	25
Tabla 5: Propiedades del cristal de cristal de centelleo	29
Tabla 6: Datos y Resultados de la calibración del detector de centelleo.	38
Tabla 7: Resultados en la determinacion de la radiacion de fondo	40
Tabla 8 : Datos y Resultados	54
Tabla 9 : Datos y Resultados	55
Tabla 10 : Comparación de datos obtenidos vs. datos reportados por el INNSZ	57

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Interacción con la materia de los rayos X y los rayos $\gamma$	5
Figura 2: Gráfica de actividad vs. No. de vidas medias de un isótopo radiactivo	8
Figura 3: Decaimiento de $^{137}\text{Cs}$	16
Figura 4: Decaimiento radiactivo del potasio	24
Figura 5: Diagrama del Detector de centelleo y fotomultiplicador	28
Figura 6: Diagrama de un analizador multicanal	30
Figura 7: Gráfica de eficiencia en la detección vs. Energía $\gamma$ emitida ,obtenida con los estándares de $^{137}\text{Cs}$ y $^{60}\text{Co}$	39
Figura 8: Espectrofotómetro gamma con detector de centelleo de NaI(Tl) acoplado a una PC	63
Figura 9: Pozo de detección	63
Figura 10: Fotografía en la que se observa el tubo fotomultiplicador	64
Figura 11: Marinelli con muestra en el pozo de detección	64
Figura 12: Marinelli con muestra .	65

# 1. INTRODUCCION:

Desde hace algunos años se ha concedido vital importancia a la composición nutricional de los alimentos y su influencia en la salud, al exceso o la carencia de algunos compuestos nutricionales y que han llevado a los investigadores a descubrir las enfermedades o la sintomatología derivada de estos excesos o carencias en la dieta cotidiana de la población. Debido a esto, el interés por descubrir y optimizar nuevas técnicas analíticas y diversificar las existentes que permitan evaluar la composición nutricional de los alimentos, así como caracterización y cuantificación de proteínas y aminoácidos, vitaminas, minerales y oligoelementos, ha tomado gran interés mundial.

En este estudio en particular se pretende conocer la cantidad de potasio presente en algunas muestras alimenticias por medio de la radiación natural que se emite a través del radioisótopo  $^{40}\text{K}$  natural del potasio, así como certificar la ausencia de contaminación radiactiva por fuentes artificiales.

Es bien sabido que para identificar y cuantificar el potasio en muestras alimenticias existen varios métodos que podrán tener ventajas ó desventajas de acuerdo con el método propuesto. En este estudio sin embargo, siempre es importante conocer las alternativas analíticas que se puedan presentar con la diversificación de los métodos analíticos.

Es conveniente reconocer el creciente uso de métodos radiactivos aplicados a los alimentos para su conservación, eliminación de brotes, inactivación de enzimas, eliminación de microorganismos patógenos, etc. Por esta causa también es necesario establecer dosis adecuadas de radiación para cada alimento y métodos analíticos que certifiquen que el alimento carece de contaminación radiactiva. En el método propuesto se pueden detectar contaminación radiactiva y la radiactividad natural emitida por el potasio-40 contenido en los alimentos.

Debido a los efectos que los radionúclidos pueden tener en el organismo se deben de tener métodos analíticos que puedan detectarlos y cuantificarlos, ya que esto nos permite evaluar indirectamente el correcto funcionamiento de las plantas nucleares. En la actualidad este tipo de análisis se ha vuelto necesario en los alimentos, especialmente en productos de importación y exportación como una exigencia internacional.

En el presente trabajo resaltamos la importancia del consumo de alimentos de libre contaminación radiactiva por fuentes artificiales, además de que puede servir como guía para el análisis de radiactividad en alimentos independientemente de si se trata de fuentes artificiales y/o naturales.

En el presente estudio se verificará por el método de espectrometría gamma la ausencia de contaminación radiactiva proveniente de fuentes artificiales; por el mismo método se cuantificará la cantidad de potasio presente en los alimentos analizados.

## **2. OBJETIVOS:**

### **OBJETIVO GENERAL:**

Verificar la ausencia de contaminantes de origen radiactivo y por el mismo método de espectrometría gamma determinar la cantidad de potasio presente mediante la detección de potasio-40 en los alimentos estudiados.

### **OBJETIVOS PARTICULARES:**

- a) Conocer el entorno radiactivo natural al que está expuesta la población
- b) Capacitación en el uso del espectrómetro gamma
- c) Establecer la metodología para la detección de Potasio-40 y Cesio-137 radiactivos en muestras de alimentos.
- d) Determinar la actividad del potasio-40 proveniente de algunos alimentos

### **3. ANTECEDENTES:**

#### **Generalidades de la Radiactividad:**

#### **3.0 RADIATIVIDAD:**

##### **3.1.1 Introducción a la Radiactividad:**

A la propiedad que poseen el radio y otros elementos inestables de emitir radiaciones espontáneamente al desintegrarse, Marie Curie le dio el nombre de radiactividad. Radiactividad es la emisión espontánea de partículas o radiación electromagnética por el núcleo de un átomo. A los elementos que tienen esta propiedad se les llama radiactivos.

El núcleo, busca la estabilidad electrónica y mientras esto ocurre, se desprenden radiaciones espontáneamente, que pueden ser partículas alfa, partículas beta o rayos gamma. A este fenómeno se le llama radiactividad. (1)

##### **3.1.2 Isótopos**

Es cada una de las dos o más variedades de un átomo que tienen el mismo número atómico, constituyendo por tanto el mismo elemento, pero que difieren en su número másico. Puesto que el número atómico es equivalente al número de protones en el núcleo, y el número másico es la suma total de protones y neutrones en el núcleo, los isótopos del mismo elemento sólo se diferencian en el número de neutrones que contienen.

Todos los isótopos de los elementos con un número atómico superior a 83 (por encima del bismuto en el sistema periódico) son radiactivos, y también lo son algunos de los isótopos más ligeros, por ejemplo, el potasio 40. Se conocen unos 280 isótopos estables (no radiactivos) existentes en la naturaleza. (2)

##### **3.1.3 Radioisótopos**

Se ha descubierto más de una docena de radioisótopos naturales de vida larga y la lista continúa creciendo a medida que los métodos para detectarlos se hacen más sensibles. Sin embargo, son sólo tres de ellos: uranio 238, torio 232 y potasio 40, los que generan la mayor parte de la radiación natural presente en el medio ambiente. (1)

##### **3.1.4 Series Radiactivas**

Todos los elementos del Polonio al Uranio no tienen isótopos estables. Todos los átomos en esa región son miembros de series radiactivas en las cuales los productos de una desintegración son a su vez radiactivos y tienden a desintegrarse formando las series radiactivas. (2)

##### **3.1.5 Radiación ionizante:**

Son muchas las radiaciones que existen, por lo que se han clasificado en ionizantes y no ionizantes. Entre las primeras están los rayos X, rayos alfa, beta y gama, estas radiaciones son capaces de ionizar la materia por donde pasan, esto significa que provocan desprendimiento de electrones de los átomos, y si éstos están formando moléculas en células, afectará el comportamiento del organismo. Esto se debe a la gran cantidad de energía que poseen.

Aproximadamente un 87% de la dosis de radiación que recibimos proviene de fuentes naturales. La radiación está en todas partes: en los hogares, en el aire que se respira, en los alimentos que se ingieren; incluso el cuerpo es radiactivo. La propia Tierra es radiactiva por naturaleza y expone a los habitantes a la radiación proveniente de las rocas superficiales y los suelos.

La radiación ionizante, al igual que el calor y la luz, es una forma de energía. Incluye partículas y rayos emitidos por material radioactivo, las estrellas y equipos de alto voltaje. La mayor parte

ocurre naturalmente y cierta parte es producida por actividades humanas. En dosis muy altas, la radiación ionizante puede causar enfermedades o la muerte. Cualquier dosis posiblemente puede producir cáncer luego de varios años.

La radiación ionizante posee suficiente energía para desplazar electrones de átomos y moléculas (tales como agua, proteína y DNA) a los que impactan o que pasan cerca.

No se ha demostrado que la exposición a bajos niveles de radiación ionizante del medio ambiente afecte la salud de seres humanos. La exposición a altas dosis de radiación ionizante puede causar quemaduras de la piel, caída del cabello, náuseas, defectos de nacimiento, enfermedades y la muerte. Los efectos dependerán de la cantidad de radiación ionizante que recibió y por cuánto tiempo, y de factores personales tales como el sexo, edad a la que se expuso, y de su estado de salud y nutrición. Aumentar la dosis produce efectos más graves. En grandes poblaciones expuestas a pequeñas dosis de radiación a causa de accidentes nucleares se ha observado un aumento de la tensión psicológica (stress). En gente expuesta a altas dosis de radiación ionizante antes de nacer se han observado efectos sobre la función mental. (3)

### **3.1.6 Decaimiento Radiactivo**

Existen en la naturaleza algunas sustancias que son inestables. Los átomos que conforman estas sustancias se transforman espontáneamente en otros átomos a través de la emisión de partículas y rayos gamma. Los núcleos pueden transformarse unos en otros, o pasar de un estado energético a otro, mediante la emisión de radiaciones. Se dice entonces que los núcleos son radiactivos; el proceso que sufren se denomina decaimiento radiactivo. Esta transformación o decaimiento sucede de manera espontánea en cada núcleo, sin que pueda impedirse mediante ningún factor externo.

Algunos de estos núcleos radioactivos están presentes en la naturaleza tienen dos posibilidades:

- a) estabilizarse (estable)
- b) convertirse en otro núcleo inestable (radioactivo)

En el primer caso ya no emitirá más radiación, en el segundo pueden aparecer, nuevamente, algunos de los procesos de emisión radioactiva ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ). (4)

#### **3.1.6.1 Radiación Alfa**

La radiación alfa consiste en un núcleo de átomos de helio, o sea está formada por dos protones y dos neutrones y posee una carga de  $+2e$  y una masa aproximada a 4 veces la masa del electrón. La radiación alfa es la menos penetrante siendo absorbida fácilmente en unos pocos centímetros de aire o por unas hojas de papel. Debido a su masa relativamente grande y su doble carga es un agente de ionización muy efectivo.

#### **3.1.6.2 Radiación Beta**

La radiación beta consiste en electrones que se originan en el núcleo del átomo con velocidades cercanas a la velocidad de la luz. La partícula beta tiene las mismas propiedades que los electrones atómicos. La radiación beta tiene un poder de penetración intermedio, apreciablemente mayor que el de la radiación alfa; puede viajar varios metros en el aire o a través de varias láminas de aluminio antes de ser completamente absorbida

#### **3.1.6.3 Radiación Gamma**

La radiación gamma corresponde al espectro electromagnético y como tal se mueve a la velocidad de la luz. Esta radiación es la más penetrante, puede atravesar grandes espesores de plomo y su absorción no es total. La radiación gamma es de la misma naturaleza que los rayos X y la luz visible y sólo difiere de éstos por su origen y frecuencia.

Los rayos gamma, en la mayoría de los casos, acompañan a la emisión de partículas alfa o beta y acarrean el exceso de energía que tiene el núcleo después de su decaimiento. Cuando un átomo emite un rayo gamma (sin carga), se altera su contenido energético pero no cambia el número de partículas, de modo que continúa siendo el mismo elemento. (5)

### 3.1.6.4 Captura electrónica

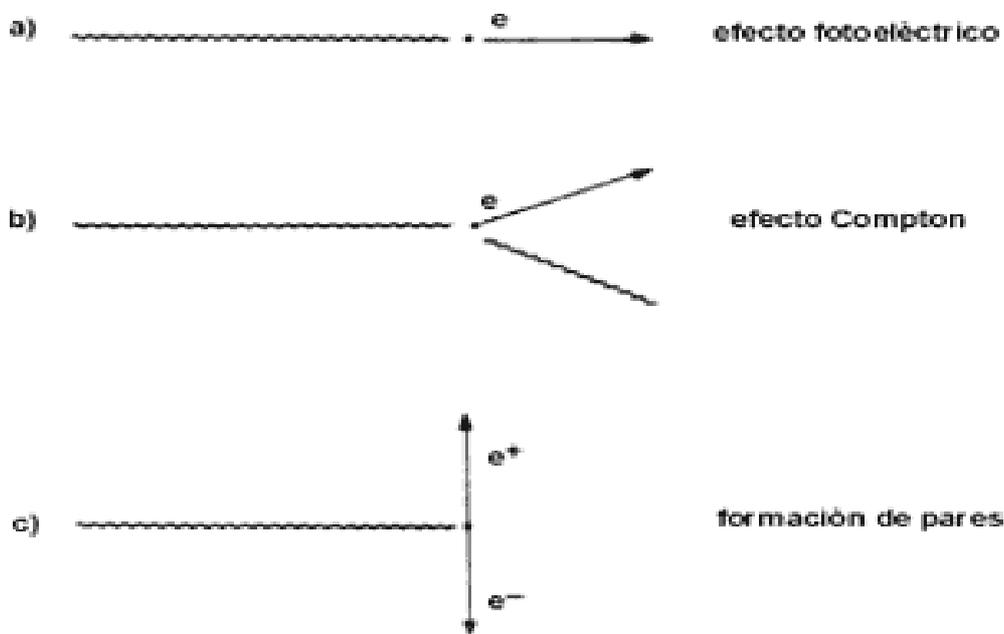
El decaimiento también puede ocurrir por captura electrónica, donde un electrón del orbital, junto con un protón del núcleo son transformados en un neutrón. En los decaimientos radioactivos el nuevo núcleo generalmente emite radiación electromagnética de muy alta frecuencia, que es radiación gamma. (4)

### 3.1.7 Eficiencia en la detección

La eficiencia en la detección es la relación entre cuentas que produce el sistema contra el número de radiaciones que emite la muestra, es decir es la medición de la probabilidad de que las detecciones sean registradas por un detector asociado a un instrumento que cuantifica la radiactividad. No todos los rayos X emitidos generan una cuenta, solo una fracción y esta es la eficiencia en la detección. (6)

### 3.1.8 Interacción de la radiación con la materia

Los rayos X y los rayos  $\gamma$ , sufren principalmente tres efectos: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la formación de pares. Cuando sucede el efecto fotoeléctrico el fotón (X o  $\gamma$ ) transfiere toda su energía a un electrón del material; esta energía se usa por una parte para liberar al electrón y por otra para darle velocidad. Si sucede el efecto Compton, la energía del fotón original se reparte entre un electrón del material y un nuevo fotón más débil. Por último, si la energía del fotón original es mayor que 1.02 MeV, puede suceder la formación de pares, en que el fotón se transforma en par electrón-positrón ( $e^-$ ,  $e^+$ ).



**Fig. 1: Las tres maneras principales en que los rayos X y los rayos  $\gamma$  interactúan con la materia. En los tres casos se producen electrones energéticos.**

Los aparatos diseñados para medir su energía e intensidad están basados en estos efectos:

- 1) La producción de iones cargados eléctricamente,
- 2) la producción de excitación que se emite en forma de luz. (4)

### 3.1.9 Ley del Decaimiento Radiactivo y velocidad de desintegración:

Cada núcleo radiactivo de un radioisótopo particular tiene la misma posibilidad de desintegración en la unidad de tiempo.

El decaimiento radiactivo de los núcleos no sigue un comportamiento lineal, sino exponencial. La probabilidad de decaimiento es constante.

Es muy frecuente que el producto del decaimiento (hijo), sea a su vez radiactivo, generándose nietos y otros descendientes, hasta llegar a uno que sea estable.

La velocidad de decaimiento se llama actividad ó radiactividad (**A**) y representa el número de núcleos que decaen por unidad de tiempo (desintegraciones del núcleo por unidad de tiempo). La ecuación que representa la actividad es:

$$A = - dN / dt$$

Donde:

**N** = número de átomos radiactivos del radionúclido original

**t** = tiempo

El signo negativo indica que **N** disminuye con el tiempo

La actividad es directamente proporcional al número de átomos radiactivos presentes al inicio, por lo que:

$$A = - dN / dt = \lambda N$$

Esta es la ecuación fundamental del decaimiento radiactivo, en donde:

**λ** es la constante de decaimiento característica para cada especie radiactiva y representa la probabilidad de desintegración del radionúclido en la unidad de tiempo.

Al integrar la ecuación tenemos:

$$\int_{N_0}^N dN / N = - \lambda \int_0^t dt$$

$$\ln N - \ln N_0 = - \lambda t$$

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

En donde **N<sub>0</sub>** = Número de átomos radiactivos y **N** el número de átomos en el tiempo **t**

Ya que la actividad es proporcional al número de átomos, podemos decir también que la ley exponencial de decaimiento es la siguiente:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

En esta fórmula:

**A** representa el número de núcleos en el instante **t**;

**A<sub>0</sub>** es el número inicial cuando **t** = 0;

**λ** se denomina la constante de decaimiento;

**e** es la base de los logaritmos naturales.

La constante de decaimiento  $\lambda$  representa la probabilidad de que haya decaimiento. Está relacionada con la vida media como sigue:

$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}}$$

En otras palabras, la probabilidad de decaimiento es inversamente proporcional a la vida media. Cuanto mayor es  $\lambda$ , más rápidamente decae y menos tiempo tarda. (7)

$$A = A_0 e^{-(0.693 t / T)}$$

Donde:

$A$  = Actividad del radionúclido.

$A_0$  = Actividad inicial del radionúclido.

$T$  = vida media del radionúclido en s.

$t$  = Tiempo transcurrido.

Si trazamos una gráfica de los valores de  $t$  contra los de  $A$ , se obtiene la curva de decaimiento característica para cada radionúclido. Como  $A$  es una función exponencial de  $t$ , tenemos que  $\ln A = -\lambda t + \ln A_0$ , de modo que trazando la gráfica de  $t$  contra  $A$  en papel semilogarítmico, se obtiene una línea recta característica del radionúclido con pendiente  $-\lambda$ .

### 3.1.10 Tiempo de vida media

Una cantidad característica del decaimiento exponencial de los núcleos es la vida media  $t_{1/2}$ . Es el tiempo que tarda el número de núcleos de un elemento en reducirse a la mitad. Es decir que después de una vida media  $A = \frac{1}{2}A_0$

Cuando la actividad, no importa cual sea su nivel a un tiempo dado  $t_0$ , alcanza un valor igual a la mitad del inicial después de transcurrido el tiempo  $t_{1/2}$ , tendremos

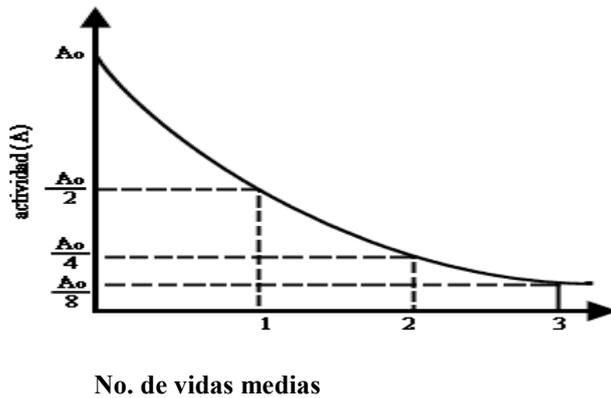
$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}$$

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

$$0 - 0.693 = \lambda t_{1/2}$$

$$\frac{0.693}{\lambda} = t_{1/2}$$

Esta es la ecuación matemática de la vida media de los radioisótopos, para ilustrar mejor esto se muestra la siguiente figura:



**Figura 2. Actividad de un isótopo radiactivo en función del tiempo transcurrido. Después de una vida media el isótopo radiactivo le queda sólo la mitad de su radiactividad.**

Cada tipo de núcleo radiactivo tiene una vida media distinta, incluso a veces se mide la vida media para identificar el elemento. (4)

De la naturaleza exponencial de la ley de decaimiento radiactivo se sigue que transcurridas una vida media la actividad es reducida a  $A_0/4$  y después de  $n$  vidas medias a  $A_0/2^n$

### 3.1.11 Electrón-volt y factores de conversión

La unidad más conveniente para medir la Energía de las radiaciones nucleares es el mega electronvoltio (MeV) que se define como un millón de veces la energía adquirida por un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de un voltio.

La energía cinética que adquieren los electrones al acelerarse depende del voltaje aplicado según la fórmula  $E=eV$ , o sea, es el producto de la carga del electrón ( $e$ ) y el voltaje aplicado ( $V$ ). Por ejemplo, un electrón acelerado por un voltaje de un volt adquiere una energía de un electrón-volt que equivale a  $1.6 \times 10^6$  ergios y a  $3.827 \times 10^{-4}$  cal.

TABLA 1: FACTORES DE CONVERSION DE eV a:

Nm	Å	cm <sup>-1</sup>	MHz	J
$1.240 \times 10^3$	$1.240 \times 10^4$	$8.0655 \times 10^3$	$2.418 \times 10^8$	$1.602 \times 10^{19}$

Las radiaciones nucleares tienen normalmente energías del orden de los MeV.

### 3.1.12 Edades Geológicas

Para la medida de edades geológicas, como la edad de ciertos yacimientos o la edad de la Tierra, se utilizan isótopos radiactivos de vidas medias muy largas.

Son muy pocos los átomos radiactivos con vidas medias del orden de la duración de tiempos geológicos. Los geocronólogos usan principalmente tres relojes, los cuales se caracterizan por su par de átomos: el padre, siempre radiactivo, y el hijo, que puede o no ser radiactivo. Estos métodos son conocidos con los nombres de potasio-argón, rubidio-estroncio y uranio-plomo, en virtud de que el primer isótopo de cada par es el átomo padre, y el segundo su descendiente.

El potasio-40 que tiene una vida media de más de 1 260 000 000 de años al decaer da lugar al nacimiento del argón-40; el rubidio-87, por su parte, da lugar al nacimiento del estroncio-87, con una vida media de 48 000 000 000 de años; y finalmente, el torio-232 el uranio-235 y el uranio-238 tienen por descendientes tres cadenas radiactivas que finalizan en dos isótopos estables del plomo, de número de masa 204 y 206, respectivamente.

Estos isótopos radiactivos padres generan a sus descendientes muy lentamente en el transcurso de millones y millones de años. Al analizar una muestra de acuerdo con la presencia del isótopo hijo, sea radiactivo o no, puede determinarse, con ayuda de las leyes del decaimiento radiactivo, el tiempo transcurrido desde la formación del yacimiento o de la Tierra. (2)

### 3.1.13 Unidades de Radiación

Un Becquerel (Bq) es la actividad de una fuente radiactiva en la que se desintegra un núcleo por segundo en un instante dado. El Curie (Ci) es la unidad antigua de medida de radiactividad, definida como la actividad de un gramo del isótopo Ra-226, su equivalencia es:

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}.$$

Tenemos entonces que:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}; \text{ por lo tanto}$$
$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$$

Los submúltiplos del Curie se emplean frecuentemente:

$$1 \text{ mCi} = 3.7 \times 10^7 \text{ dps}$$
$$1 \text{ } \mu\text{Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{ dps}$$
$$1 \text{ pCi} = 3.7 \times 10^{-2} \text{ dps}$$

Un coulomb representa la unidad de carga eléctrica y equivalente a  $10^{19}$  electrones. Al atravesar la materia la radiación genera cargas eléctricas. Se define en base a esta idea el Röntgen:

$$3876 \text{ Röntgen (R)} = 1 \text{ Coulomb/Kg.}$$

que representa la ionización que se produce en un kilogramo de aire. (5)

La intensidad de un campo de rayos gamma es medida por:

$$\text{Coulomb/Kg. seg. o R/seg.}$$

Pero el efecto biológico depende de la energía que absorbe un tejido biológico, los efectos de las radiaciones dependen de la energía que se absorbe por unidad de masa de cualquier material. Entonces la cantidad de dosis absorbida está definida como la energía por unidad de masa que se deposita en el material. La unidad es el Gray (Gy), que equivale a un joule por kilogramo. Tradicionalmente se ha usado el RAD (Röntgen absorbed dose), que equivale a 100 erg/gr.

La conversión de unidades es entonces:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 10.000 \text{ erg/g} = 100 \text{ rad}$$

Pero, aunque el efecto biológico depende fuertemente de la dosis absorbida, también resulta importante cuan rápidamente se absorbe, cuan uniforme es y el tipo de radiación. Para considerar estos tres aspectos se usa, la dosis equivalente definida por:

$$\text{Dosis equivalente} = \text{dosis absorbida} \times \text{factores de cualidad}$$

La unidad es el sievert (Sv), aunque tradicionalmente se ha utilizado el rem (Röntgen equivalente en hombre)

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Entonces para: radiación  $\gamma$  y X

$$\begin{aligned} 1 \text{ Gy} &\approx 1 \text{ Sv} \\ 1 \text{ rad} &\approx 1 \text{ rem} \end{aligned}$$

Si los efectos estudiados son biológicos, se usa el término Dosis efectiva. Su unidad también es el Sievert, pero se toma en cuenta la sensibilidad de los tejidos irradiados. (8)

Una dosis letal para humanos es de 10 000 rads.

De acuerdo a la NOM-088-SSA-1-1994 y FDA el contenido de radionúclidos en alimentos debe reportarse en Bq/kg

### **3.1.14 Aplicaciones de la Radiactividad**

El hombre ha encontrado la manera de usar las propiedades radioactivas de la materia para un sinnúmero de aplicaciones que constituyen un beneficio real. Algunos ejemplos de los usos de la radiación son los siguientes:

#### Irradiación de alimentos

Prolonga los períodos de almacenamiento de verduras y hortalizas sin alterar las propiedades nutritivas. Así se evita el brote de tubérculos para exportación, se elimina la posibilidad de *Salmonella* en encurtidos, etc.

#### Seguridad

Se usan rayos X para detectar elementos que atentan contra la seguridad de las personas en aeropuertos, edificios públicos, etc.

#### Industria

Se verifica con gammagrafía soldaduras de metales para encontrar defectos y poder evitar daños o accidentes a instalaciones y personas.

#### Agricultura

Se estudia la forma y cantidad de absorción de fertilizantes en plantas, incorporándoles un radionúclido y luego colocándolas sobre una película fotográfica.

#### Hidrología

Es posible determinar el curso de corrientes subterráneas y descubrir depósitos de agua,

incorporando un radionúclido a la misma. Se puede conocer el movimiento de los sedimentos de los fondos de ríos.

### Arqueología

Se estima la antigüedad de restos de animales, plantas u objetos fabricados por el hombre, midiendo el contenido de  $^{14}\text{C}$  y  $^{40}\text{K}$

### Generación de electricidad

Mediante la fisión controlada de un reactor nuclear, se dispone de una fuente de energía abundante, que en estos años constituye una alternativa a gran escala frente al agotamiento de las reservas de combustibles fósiles en el mundo.

### Medicina

Las radiaciones se usan en medicina para:

#### Esterilización:

Con esta técnica se tratan gases, jeringas y material quirúrgico. Alimentos para pacientes inmunocomprometidos.

#### Diagnóstico:

Radiografía, angiografía, que utiliza Rayos X y sustancias radiomarcadores para observar el funcionamiento del corazón y arterias, las técnicas de diagnóstico usando radiación se transformaron en un auxiliar poderoso del médico para beneficio de muchas personas.

#### Terapia:

La radioterapia se utiliza para destruir células cancerosas mediante la aplicación de radiación gamma. Para el tratamiento de tumores situados en profundidad se utiliza principalmente  $^{60}\text{Co}$ . Los usos médicos de radiación en su conjunto constituyen el 16.6 % de la dosis anual de un habitante cualquiera de la Tierra. (5)(8)

**Tabla 2: Algunos núclidos o isótopos radiactivos, sus vidas medias y sus aplicaciones médicas como marcadores en el cuerpo humano. (9)**

<i>Núclido</i>	<i>Vida media</i>	<i>Área del cuerpo que se estudia</i>
$^{131}\text{I}$	8.1 días	Tiroides
$^{59}\text{Fe}$	45.1 días	Glóbulos rojos
$^{99}\text{Mo}$	67 horas	Metabolismo
$^{32}\text{P}$	14.3 días	Ojos, hígado, tumores
$^{51}\text{Cr}$	27.8 días	Glóbulos rojos
$^{87}\text{Sr}$	2.8 horas	Huesos
$^{99}\text{Tc}$	6.0 horas	Corazón, huesos, hígado, pulmones
$^{133}\text{Xe}$	5.3 días	Pulmones
$^{24}\text{Na}$	14.8 horas	Sistema circulatorio

Además en la última década se han descubierto varias aplicaciones importantes de las técnicas nucleares en la investigación de la nutrición humana. Entre los temas está el consumo de energía, cuestión importante para las regiones en desarrollo. Los seres humanos pueden adaptarse metabólicamente a dietas con niveles bajos de ingestión energética. Otro tema de actualidad es la terapia de dieta óptima, con empleo de alimentos locales, para tratar algunas enfermedades como la diarrea crónica en los niños, y las enfermedades infecciosas, como la hepatitis viral. Los trazadores de isótopos estables de hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, ofrecen posibilidades para estudiar esos problemas (10).

En la tabla 2 se presentan algunos radioisótopos que se usan comúnmente en diagnóstico y que se administran a los pacientes por lo que es importante conocer su vida media y por lo tanto tiempo de eliminación en el organismo.

## **3.2 EFECTOS NOCIVOS DE LA RADIACION EN EL HOMBRE:**

### **3.2.1 Clasificación de los materiales radiactivos naturales:**

Los materiales radiactivos naturales se pueden clasificar en tres categorías. La primera categoría está formada por los radioisótopos primordiales, que se llaman así por existir desde que se formó la Tierra, hace cinco mil millones de años, y son aquellos que tienen una vida media muy larga, quizás como la edad de la Tierra o más. El potasio tiene un isótopo radiactivo de vida muy larga y es parte importante de la radiactividad natural; el rubidio, el samario y el lutecio también tienen isótopos radiactivos y contribuyen a la radiactividad natural, pero en menor escala.

La segunda categoría está formada por radioisótopos radiogénicos ó secundarios que se van formando por el decaimiento de otros isótopos radiactivos.

La tercera categoría de radioisótopos pertenece a los radioisótopos cosmogénicos ó inducidos, los cuales se están produciendo continuamente en la naturaleza en el espacio que rodea la tierra, ó atmósfera y son arrastrados por la lluvia hacia el planeta. Hoy se sabe que un fenómeno que se repite continuamente en la naturaleza es la producción de isótopos radiactivos. Los radioisótopos cosmogénicos se producen en la Tierra por el efecto de la radiación cósmica sobre los elementos en la Tierra. Entre los isótopos radiactivos formados por la interacción de los rayos cósmicos con diversos elementos se encuentra el  $^{14}\text{C}$  (4)

### **3.2.2 Clasificación de las Fuentes radiactivas:**

Las fuentes radiactivas son típicamente clasificadas en dos categorías: artificiales y naturales. Las fuentes artificiales incluyen el uso de isótopos radiactivos para el uso en medicina y diagnóstico, así como el uso de rayos X.

#### **3.2.2.1 Fuentes naturales de radiación**

Entre las fuentes naturales de radiaciones que forman y configuran nuestro mundo se encuentran las rocas y la corteza terrestre el terreno que pisamos a diario, que cultivamos, o con el cual construimos nuestras viviendas, puentes, calles, etc., contiene pequeñas cantidades de elementos radioactivos, provenientes principalmente del  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ . Por ejemplo, algunas de estas rocas como el granito se usan comúnmente en los materiales de construcción y es común en las grandes ciudades tener altos niveles en la radiación de fondo. Además, nuestro cuerpo está formado por elementos de la Tierra y como todos los seres vivos, intercambiamos elementos con el medio. Algunos de ellos son emisores de radioactividad ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{40}\text{K}$  y  $^{87}\text{Rb}$ ). Esta fuente natural terrestre constituye el 69.4 % de la dosis anual de un habitante cualquiera de esta Tierra.

Desde el espacio exterior somos bombardeados continuamente por los rayos cósmicos, que en su mayoría son núcleos de hidrógeno. La atmósfera que rodea la tierra forma un blindaje a los mismos. Por ello, a medida que nos elevamos, la exposición a la radiación cósmica es mayor. Esta fuente natural cósmica constituye el 13.1% de la dosis anual de un habitante cualquiera sobre la tierra. Las fuentes naturales administran el 82.5 % de la dosis anual de radiación de un habitante cualquiera del planeta.

La radiación natural a la que está expuesta la población proviene de:

- la desintegración de isótopos radiactivos en la corteza terrestre y depende del tipo de rocas que existen en el lugar,
- de la radiación cósmica que depende de la altura sobre el nivel del mar,

- y de los isótopos radiactivos que forman parte de los seres vivos, también llamada radiación interna y que depende de la edad del ser humano y su dieta.

Existen además otras fuentes de radiación que afectan a la población: las que se utilizan en equipo médico, o bien las que provienen de concentraciones muy elevadas de radioisótopos en recintos cerrados y, en general, del extenso uso que se ha dado en este siglo a la energía nuclear. Es importante conocer el origen, la concentración y los efectos de las radiaciones nucleares, ya que producen modificaciones en la materia que atraviesan y, por lo tanto, pueden afectar el desarrollo y la estructura de las células vivas. (2) (8)

### **3.2.2.2 FUENTES DE RADIACIÓN INTERNA:**

#### **3.2.2.3 Radón**

En los últimos años se ha determinado que la fuente de radiación de origen natural que más contribuye a la dosis efectiva recibida por el ser humano es el gas radón que es un gas incoloro, insípido e inodoro. El Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) ha estimado que el radón y los radionúclidos resultantes de su decaimiento contribuyen con las tres cuartas parte de la dosis efectiva recibida por el hombre debida a las fuentes naturales terrestres, y son aproximadamente el 40% de la recibida de la totalidad de las fuentes naturales. La mayor parte de la dosis debida proviene del radón, especialmente en ambientes cerrados, proviene de los isótopos que se generan luego de la desintegración alfa del radón.

El radón se presenta en dos formas principales; el radón 222, uno de los radionúclidos presentes en el proceso de desintegración del uranio 238, y el radón 220 producido en las series de desintegración del torio 232. El radón fluye del suelo en todas partes del globo, pero sus niveles en el ambiente varían mucho de un lugar a otro. Las concentraciones de radón en el interior de los edificios son, en promedio, unas 8 veces superiores a las existentes en el exterior. Si bien los materiales de construcción contienen elementos radiactivos naturales y suelen ser fuentes de emanación de radón, el terreno en el que se asientan las viviendas es casi siempre la fuente más importante. En países de clima frío, como en el caso de Suecia y Finlandia, donde las viviendas se mantienen cerradas la mayor parte del año y con un mínimo intercambio de aire con el exterior, la concentración de radón supera los 800 Bq/m<sup>3</sup>

El UNSCEAR, en su informe del año 1993, estima una concentración media ponderada mundial del radón en el interior de viviendas, de 40 Bq/m<sup>3</sup>. En las áreas continentales, el valor promedio en el exterior es de 10 Bq/m<sup>3</sup> y algo menor en áreas costeras. (11) (12)

#### **3.2.2.4 Alimentos y bebidas:**

Así como podemos absorber radón al respirar, al alimentarnos ingerimos sustancias radiactivas en pequeñas cantidades. Éstas constituyen una dosis interna variable, según el régimen de alimentación, la edad y la capacidad de eliminar sustancias; se estima que representa alrededor del 20% de la dosis ambiental. El que fuma cajetilla y media al día recibe en los pulmones 8 000 mrem/año debido al polonio que contiene el tabaco. (2)

La radiación interna proviene de las sustancias radiactivas presentes en los alimentos, en el agua y en el aire, las cuales, al ser ingeridas o inhaladas, se absorben en los tejidos vivos. Los principales isótopos radiactivos que contiene el cuerpo humano son el <sup>40</sup>K, el <sup>14</sup>C y el tritio, pero también pueden encontrarse cantidades menores de algunos elementos pesados como el radio, el plomo o el uranio.

Los plátanos y algunos sustitutos de sal contienen altos niveles de potasio, el cuál contiene el isótopo radiactivo  $^{40}\text{K}$ . (13)

El cuerpo humano contiene pequeñas cantidades de  $^{14}\text{C}$  y  $^{40}\text{K}$ . El  $^{14}\text{C}$  produce una dosis aproximada de 10 milisievert por año y el  $^{40}\text{K}$  contribuye con una dosis de 0.2 milisievert por año.

La dosis media anual que una persona recibe por alimentos y bebidas es de 0.3 mSv. de los cuales 0.18 mSv. proceden del  $^{40}\text{K}$ . El rango en que varía esta radiación por alimentos está entre 0.1 y 1 mSv.

Los mariscos son los alimentos que más radiación natural concentran, de tal manera que una persona que habitualmente coma muchos mejillones, ostras, camarones y caracoles marinos, puede recibir hasta un 50% más de la radiación habitual por alimentación que la media de la población. (14)

Aproximadamente 15 millones de átomos de potasio  $^{40}\text{K}$  y 7000 átomos de uranio natural se desintegran en nuestro interior cada hora. (2)

El potasio tiene decaimiento gamma a 1461 KeV y decaimiento beta a 1320 KeV

**TABLA 3 : DOSIS ANUAL DE FUENTES NATURALES EN ZONAS DE FONDO DE RADIACIÓN NORMAL**

FUENTES DE RADIACIÓN	DOSIS EQUIVALENTE EFECTIVA ANUAL ( $\mu\text{Sv}$ )
Rayos cósmicos	380
Radionuclidos cosmogénicos	12
Radionuclidos en la corteza, flora y fauna	
potasio 40	300
rubidio 87	6
Serie de uranio 238:	141
Uranio 238 – torio 230	4
Radio 226	1200
radón 222 – polonio 214	50
Serie del torio 232:	
Torio 232 - torio 228	196
Torio 220 - polonio 212	73
<b>TOTAL</b>	<b>2192</b>

( $\mu\text{Sv}$ ) Unidad de la dosis equivalente y de la dosis efectiva en el Sistema Internacional de Unidades  $10^{-6}$  Sv. (8)

### 3.2.3 RADIACIÓN ARTIFICIAL:

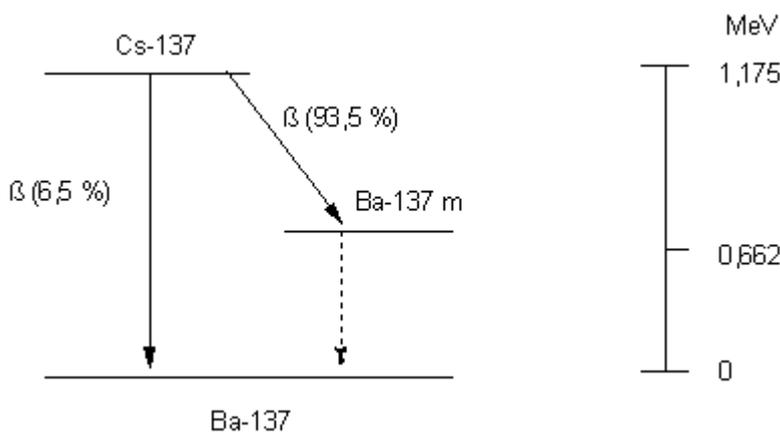
#### 3.2.3.1 Contaminación por Cesio:

La exposición al cesio estable o radioactivo ocurre a través de la ingestión de alimentos o agua potable contaminados o al respirar aire contaminado. Niveles altos de cesio radioactivo en o cerca del cuerpo pueden producir náusea, vómitos, diarrea, hemorragia, coma y aún la muerte. Esto puede ocurrir después de accidentes nucleares o detonación de bombas atómicas. (15)

El cesio es un elemento natural que se encuentra combinado con otros elementos en rocas, en el suelo y en polvo en pequeñas cantidades. El cesio que ocurre en forma natural no es radioactivo y se conoce como cesio estable. Hay sólo una forma natural de cesio estable en el ambiente, el  $^{133}\text{Cs}$ .

Las formas de cesio radioactivas son producidas por la fisión del uranio en las barras de combustibles durante la operación normal de plantas nucleares o cuando se detonan armas nucleares. Las formas radioactivas del cesio son inestables y eventualmente se transforman en elementos más estables a través del proceso de decaimiento radioactivo. Los dos isótopos radioactivos más importantes del cesio son  $^{134}\text{Cs}$  y  $^{137}\text{Cs}$ . Los isótopos radioactivos están decayendo o cambiando constantemente a isótopos diferentes a través de la emisión de radiación. Cada átomo de  $^{134}\text{Cs}$  se transforma ya sea a xenón 134 ( $^{134}\text{Xe}$ ) o a bario 134 ( $^{134}\text{Ba}$ ), ninguno de los cuales es radioactivo, mientras que cada átomo de  $^{137}\text{Cs}$  decae a bario 137 ( $^{137}\text{Ba}$ ), el que tampoco es radioactivo. A medida que el  $^{134}\text{Cs}$  y el  $^{137}\text{Cs}$  decaen, emiten partículas beta y radiación gama. La vida-media del  $^{134}\text{Cs}$  es aproximadamente 2 años y la del  $^{137}\text{Cs}$  es aproximadamente 30.2 años.

**Figura 3: Decaimiento de  $^{137}\text{Cs}$**



**$^{137}\text{Cs}$  se desintegra con una probabilidad de 6.5% directamente e indirectamente con una probabilidad de 93.5 % a  $m^{137}\text{Ba}$  y a  $^{137}\text{Ba}$  estable.**

Durante el decaimiento beta los rayos emitidos tienen una energía de 0.513 MeV. El  $m^{137}\text{Ba}$  que es un estado excitado ó metaestable y que se desintegra con una vida media de 2.55 minutos liberando rayos gamma (0.662 MeV). Mediante este rayo determinamos la actividad de  $^{137}\text{Cs}$ . (7)

El decaimiento radioactivo disminuye la concentración de  $^{134}\text{Cs}$  y de  $^{137}\text{Cs}$ . Tanto el cesio estable como el radioactivo son el mismo elemento y se comportan de manera químicamente similar en el cuerpo. Los compuestos de cesio pueden movilizarse largas distancias en el aire antes de ser depositados nuevamente en el suelo por la lluvia o la gravedad. La mayoría de los compuestos de cesio son muy solubles en el agua y en suelos húmedos. El cesio se adhiere firmemente a la mayoría de los suelos y no se moviliza mucho bajo la superficie del suelo. Como consecuencia, el cesio no está fácilmente disponible para ser incorporado por plantas a través de las raíces. Sin embargo, el cesio radioactivo puede entrar a las plantas si cae sobre la superficie de las hojas. (16)

La concentración de cesio natural en el aire generalmente es menos de 1 nanogramo por metro cúbico de aire ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ). Por lo general, la cantidad de cesio en el agua potable es aproximadamente 1 microgramo por litro de agua ( $\mu\text{g}/\text{L}$ ). Como promedio, una persona traga cerca de 10  $\mu\text{g}$  de cesio estable al día en los alimentos y el agua, e inhala cerca de 0.025  $\mu\text{g}$  al día. Las plantas y los animales contienen cesio en concentraciones de aproximadamente 1 a 300  $\text{ng}/\text{g}$ . (12)

El cesio radioactivo se ha detectado en cuerpos de agua superficial y en muchos tipos de alimentos, incluso leche materna y leche pasteurizada. La cantidad de cesio radioactivo en los alimentos y la leche depende mucho de varios factores.

En Europa los impactos radiológicos del  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{134}\text{Cs}$  liberados en el accidente de Chernobyl Rusia en el año de 1986 fueron inmensos. Entre estos se incluyen la dispersión de cesio radioactivo en el ambiente y la incorporación de radioactividad por parte de renos, caribúes y el ganado.

El cesio estable y el radioactivo pueden entrar al cuerpo a través de los alimentos o del agua, del aire que respira o por contacto con la piel. Cuando se ingiere, respira o toca cosas que contienen compuestos de cesio que pueden disolverse fácilmente en agua, el cesio se incorpora al torrente sanguíneo y es transportado a todo el cuerpo.

Una vez que el cesio entra al cuerpo, los riñones empiezan a removerlo de la sangre. Cierta cantidad de cesio se elimina rápidamente del cuerpo en la orina. Una pequeña porción se elimina en las heces. Alguna cantidad de cesio que el cuerpo absorbe puede permanecer en el cuerpo durante semanas o meses, pero es eventualmente eliminada lentamente a través de la orina y las heces. (16)

### **3.2.4 Efectos biológicos de la radiación**

Sin duda los efectos biológicos de la radiación están relacionados estrechamente con la dosis expresada en rem:

0 - 25 rem: No se observan efectos inmediatos, parecen no tener consecuencias importantes.

25 - 100 rem: Se observan algunas alteraciones especialmente en la sangre hay evidente compromiso de otras funciones del organismo, pero son recuperables.

100 - 300 rem: Ya hay alteraciones más evidentes, vómitos, caída del pelo, hemorragias, cuya recuperación es parcial.

200 - 600 rem: Las probabilidades de morir aumentan, por afecciones a la médula ósea, síndrome gastrointestinal y lesiones al Sistema nervioso.

La acción de la radiación se traduce en un aumento de radicales libres. Los radicales libres son generados por la ionización y ruptura de enlaces moleculares de la materia irradiada. A este daño directo de la radiación debe adicionarse la modificación de estructuras debido a las reacciones de oxido-reducción de los radicales libres con las moléculas de su entorno, ya que se produce una cierta cantidad de radicales libres, asociados a procesos metabólicos, en condiciones fisiológicas están compensados: la producción de radicales libres, la eliminación o bloqueo de estos y la reparación del daño que ellos pudieren causar. (17)

Tejidos con baja actividad antioxidante, como el ojo, son más sensibles al daño por radiaciones ionizantes y propensos a la formación de cataratas. El daño puede ser inmediato en el caso de altas dosis o diferido por alteración de estructuras importantes que no puedan ser reemplazadas o reparadas. No todas las estructuras celulares están expuestas al mismo daño. El riesgo de daño biológico para una misma estructura varía de acuerdo al tejido, el estado fisiológico y obviamente de la energía, intensidad, duración y naturaleza de la radiación. (12)

### **3.3 NECESIDAD DE CERTIFICAR AUSENCIA DE CONTAMINACION RADIATIVA EN ALIMENTOS:**

Uno de los grandes retos en el mundo, es contar con suficientes alimentos sanos para toda la población. Se realizan grandes esfuerzos para fertilizar la tierra, desarrollar nuevos cultivos básicos mediante biotecnología, ofrecer una infraestructura adaptada al país y, en general, crear las circunstancias apropiadas para una buena cosecha. Después de eso, hemos de hacer también esfuerzos para asegurarnos que los alimentos cultivados han de conservarse y protegerse contra contaminaciones y plagas, lo que constituye una importante prioridad para el mundo en desarrollo. (5)

Las autoridades internacionales competentes han aprobado las normas y reglamentaciones necesarias para la irradiación de determinados alimentos, en el futuro, la irradiación de alimentos puede llegar a convertirse en una de las mejores opciones en cuanto a conservación de alimentos y que puede ser un factor determinante para la humanidad y su alimentación. (3)

Desde el punto de vista económico, una de las aplicaciones es la prolongación del período de conservación, lo que tiene suma importancia en algunas zonas de nuestro país, tanto para consumo interno como para exportación de alimentos, de igual forma en reducción de las pérdidas durante el almacenamiento, esto se traduciría en disminución de pérdidas poscosecha por infestación de plagas de los alimentos básicos, como cereales (maíz, trigo, frijol, avena, cebada, etc.). Por eso, cuando no se les irradia, en su mayoría, los alimentos básicos almacenados se fumigan con productos químicos.

La irradiación es un procedimiento más en el acondicionamiento de alimentos, como la cocción, congelación y el salado, pudiéndose utilizar una mezcla de ellos. Muchos conservantes químicos (bromuro de metilo, dibromoetileno) están siendo sustituidos por la irradiación con fotones gamma del  $^{60}\text{Co}$ . (18)

La irradiación de alimentos tiene actualmente dos vertientes principales de desarrollo: la reducción de pérdidas de alimentos tras su recolección, y la mejora de la calidad sanitaria de los alimentos.

En cuanto a la reducción de pérdidas pueden citarse:

- La irradiación de fruta fresca, para eliminar insectos (especialmente la mosca de la fruta).
- La destrucción de larvas en cereales, legumbres y semillas.
- La inhibición de brotes en bulbos y tubérculos (papa, cebolla, ajo, etc.), que detiene el proceso germinativo espontáneo.

La otra vertiente tiende hacia el cumplimiento de especificaciones microbiológicas en los alimentos, que muchas veces son portadores de cantidades inaceptables de gérmenes patógenos (salmonella, trichina, etc.). También se aplica a la sanitización de especias y en la preparación de dietas especiales para enfermos con escasas defensas inmunológicas. (5)

### **3.3.1 Irradiación y modificación de la calidad nutritiva**

El pescado fresco no suele verse alterado por acción de microorganismos, sino más bien por la actividad de sus enzimas. Incluso, dependiendo del sistema de tratamiento, es frecuente que se produzca una alteración debida a la oxidación de su grasa. (19)

La oxidación de la grasa es directamente proporcional a la cantidad de radiación recibida y a la calidad de la misma. En este sentido, es más sensible la grasa del pescado que la de la carne, puesto que la grasa del pescado es altamente insaturada, lo que la hace más sensible a la acción de la oxidación, sea cual sea el elemento desencadenante. En cualquier caso, como medida preventiva, parece necesario que el límite del tratamiento se ponga en 5 kGy. Por encima de esta dosis es posible que se evidencien signos de alteración de la grasa, especialmente en alimentos sensibles. (20). (21)

Por otra parte, es posible que la irradiación afecte a la calidad proteica de los alimentos. Cuando la dosis es inferior a 5 kGy, la composición y características de los alimentos no se suelen ver afectadas. Sin embargo, cuando esta dosis se incrementa hasta 10 kGy puede apreciarse un cambio en la composición de aminoácidos. Además, esta composición se ve modificada, aún más, durante el almacenamiento previo al consumo. (22)

El color es el parámetro que el consumidor aprecia más fácilmente cuando adquiere los alimentos. También es uno de los que se han recomendado como uno de los de elección para determinar la cantidad de radiación aplicada.

Esta característica es fundamental para poder considerar el producto como aceptable por parte de los consumidores, de manera que mientras la carne posee un color algo más estable, el pescado es un producto mucho más alterable. De hecho, el pescado con colores suaves, como por ejemplo la trucha o el salmón, ven modificado su color cuando la dosis es superior a 3 kGy. (21)

### **3.3.2 Normalización nacional e internacional**

El uso de estos métodos radiactivos para conservación han creado la necesidad de establecer límites máximos y mínimos de dosis permitidas y recomendadas para la irradiación de alimentos.

Con el descubrimiento de la energía nuclear y en especial desde la invención de la bomba atómica se han esparcido por la tierra numerosos productos residuales de las pruebas nucleares.

En los últimos años la descarga en la atmósfera de materias radiactivas ha aumentado considerablemente, constituyendo un peligro para la salud pública. (5)

Como ya mencionamos en la central nuclear de Chernobyl, en la antigua Unión Soviética, tuvo lugar, el 26 de abril de 1986, lo que ha sido el peor accidente que nunca ha ocurrido en una planta nuclear. Ese día unas explosiones en uno de los reactores nucleares arrojaron grandes cantidades de material radiactivo a la atmósfera. Esta radiación no solo afectó a las cercanías sino que se extendió por grandes extensiones del Hemisferio Norte, afectando especialmente a los países de la antigua URSS y a los del Noreste de Europa.

Como consecuencia de este accidente muchas personas sufrieron gravísimas exposiciones a la radiactividad y muchos murieron y morirán. Mas de 300 000 personas tuvieron que ser evacuadas de los alrededores de la central.

Para intentar paliar los efectos del accidente la central ha sido encapsulada en 300 000 toneladas de hormigón y varios edificios y grandes cantidades de suelo han tenido que ser descontaminados.

Aunque se han hecho grandes labores de limpieza toda esa zona tiene que enfrentarse con grandes problemas a medio y largo plazo. Entre el 15 y el 20% de las tierras agrícolas y de los bosques de Bielorrusia están tan contaminados que no se podrán usar durante los próximos cien años. Los casos de leucemia han aumentado notablemente y la salud de unos 350 000 ucranianos está siendo examinada continuamente para detectar lo antes posible las muy probables secuelas de la exposición a grandes dosis de radiactividad. (1)

Otra consecuencia de este accidente ha sido la radiación que recibieron los animales y sus subproductos como carne, leche, etc. que fueron contaminados, debido a esto muchos productos no estuvieron exentos de contaminación radiactiva y a nuestro país llegó por medio de la paraestatal CONASUPO leche contaminada radiactivamente; a raíz de la polémica social, económica y política generada por este caso se ha puesto especial atención a los productos de importación para consumo humano y animal y los controles de calidad incluyen los límites permitidos por contaminación radiactiva de acuerdo a las NOM's y que se incluye el proyecto de NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-088-SSA1-1994, Bienes y Servicios. Contaminación por radionuclidos en alimentos de consumo masivo importados. Límites máximos permisibles; y que su aplicación se establece como obligatoria para alimentos de consumo masivo importados como leche y sus derivados, fórmulas para lactantes, agua purificada envasada, productos de la pesca congelados, en conserva ó seco- salados, grasas ó aceites vegetales y animales, carnes congeladas y productos cárnicos. (23)

De igual forma el proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-033-SSA1-1993, Bienes y servicios. Irradiación de alimentos. Dosis permitidas en alimentos, materias primas y aditivos alimentarios; establece los parámetros y lineamientos para la irradiación de alimentos. (24)

Las dependencias internacionales, tales como la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization WHO) y la Organización de Agricultura y Alimentos de las Naciones Unidas, (The Food and Agricultura Organization of the United Nations FAO), reconocen el proceso de la irradiación como un medio seguro para reducir el nivel de los organismos que causan enfermedades en alimentos portadores y productos alimenticios. El uso de la irradiación disminuye los niveles de estos organismos en los alimentos adquiridos por el consumidor final y permite que los alimentos permanezcan nutritivos y seguros para su consumo.

En México, varias dependencias federales están involucradas en los aspectos reglamentarios del proceso de irradiación en alimentos.

La Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA) es responsable de establecer los estándares relacionados con la seguridad en los alimentos vendidos al consumidor mexicano. Esta Secretaría evalúa la seguridad en los alimentos y la efectividad de la irradiación en la comida y evalúa los cambios químicos, microbiológicos y nutricionales que ocurren en los alimentos durante el proceso de irradiación antes de aprobar cualquier uso nuevo de irradiación para así garantizar la seguridad y la calidad nutricional de los alimentos.

La Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en México es responsable de la ejecución y cumplimiento de todos los aspectos relacionados con el uso fitosanitario de la irradiación. SAGARPA entre otros emite los estándares con respecto del uso adecuado de la tecnología para la desinfestación de la mosca de fruta.

La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS) se encarga de regular el uso de energía nuclear y materiales de acuerdo a los compromisos internacionales de México respecto del uso pacífico de la energía nuclear. Las plantas de irradiación de alimentos deben cumplir con estas normas mexicanas, independientemente de la tecnología aplicada. El CNSNS funciona como un tribunal; toma decisiones independientes para el otorgamiento de licencias para la realización de actividades relacionadas con la energía nuclear en México y establece las normas y las políticas reglamentarias para los asuntos relacionados con la salud, la seguridad y el medioambiente. (1) (4)

El estudio de los elementos traza en alimentos es importante por los posibles efectos que pueden causar en la salud. Aunque con este propósito se usan diversos métodos se ha encontrado que los métodos analíticos nucleares son especialmente ventajosos en las determinaciones de elementos traza en muchas áreas incluyendo análisis de alimentos. (25) (26)

La FDA (Food and Drug Administration) es el órgano gubernamental norteamericano encargado de regular el uso de Energía ionizante sobre los alimentos tanto los de uso interno en USA, como los de importación. (14)

La FDA a través del CFSAN (Center for food safety and applied Nutrition) ha estudiado desde 1986 el 100 % de sus productos de importación, se cuantifica  $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ , el límite es de 110 Bq/Kg. Por métodos nucleares se analizan concomitantemente  $^{40}\text{K}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e hijos,  $^{232}\text{Th}$  e hijos  $^{240}\text{Am}$  y  $^{90}\text{Sr}$ . (18)

En México el análisis es obligatorio para certificación de ausencia de contaminación radiactiva en alimentos de exportación a USA y otros países; también es obligatorio para agua embotellada y alimentos importados de acuerdo a la norma NOM-088-SSA1-1994

La Contaminación radiactiva puede definirse como un aumento de la radiación natural por la utilización por el hombre de sustancias radiactivas naturales o producidas artificialmente.

Cuando los fotones individuales de los rayos X son absorbidos por los alimentos, la energía absorbida provoca que los átomos sean ionizados hasta que toda la energía es convertida en calor ó cambios químicos. La cantidad de cambios en los alimentos dependerá de la energía total absorbida (por ej. La dosis)

La dosis permitida de radiación en los alimentos en Estados Unidos es de un máximo de 7.5 MeV ya que se ha encontrado que esta dosis es segura y que no adiciona un riesgo potencial de radioactividad al alimento.

La evaluación de la seguridad en el incremento de la energía máxima de rayos X superior a 7.5 MeV , induce radiactividad adicional a los alimentos. Los rayos X con energías superiores del umbral del átomo es capaz de emitir electrones ó neutrones del núcleo de algunos átomos que han absorbido la energía de los rayos X. El umbral de energía necesaria para causar la emisión de un protón es mayor de 7.5 MeV , es así que , el mecanismo de inducción primaria para inducir radiactividad en alimentos por 7.5 MeV , los rayos X deben de provenir de la pérdida de un neutrón. Esto en algunos casos puede dar como resultado la formación de un núcleo radioactivo. Los núcleos radiactivos son inestables y decaen a una forma más estable, espontáneamente emiten partículas y radiación electromagnética en forma de rayos gamma ( por ejemplo de alta energía de fotones ) . Frecuentemente, esta transición puede ocurrir rápidamente, así como los isótopos producidos en los alimentos en forma de rayos X pueden decaer a formas estables, el estado no radiactivo antes de facilitar la radiación. Sin embargo algunos isótopos radiactivos podrían ser lo suficientemente estables como para presentarse en los alimentos cuando se ingieren. Los átomos radiactivos decaen a un rango específico de su

identidad y al ingresar al organismo pueden emitir energía de ionización que podría ser absorbida por los tejidos del cuerpo. La energía emitida podría incrementar el riesgo de daño a la salud dependiendo de de la cantidad y tipo de radiación absorbida por el organismo y el sitio de absorción. (22).

### 3.4 Generalidades del potasio como factor alimenticio y su isótopo radiactivo $^{40}\text{K}$

#### 3.4.1 Generalidades del Potasio:

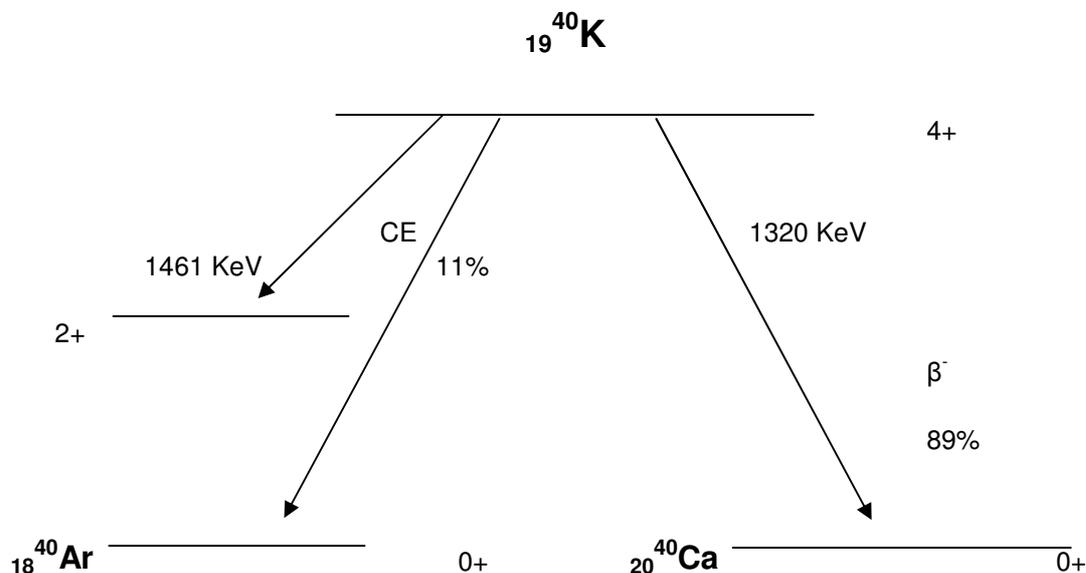
El Potasio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre (2.4% de su masa). Uno de cada 10,000 átomos de Potasio es radiactivo el Potasio-40 ( $^{40}\text{K}$ ). Cada uno tiene 19 protones y 21 neutrones en sus núcleos. Si uno de estos protones anula su carga por captura de un electrón de las capas K o L mas próximas al núcleo se convierte en un neutrón. Con 18 protones y 22 neutrones, el átomo se convierte en Argon-40 ( $^{40}\text{Ar}$ ), un gas inerte. Por cada 100 átomos de  $^{40}\text{K}$  que decaen, 11 se convierten en  $^{40}\text{Ar}$  excitados que emiten un rayo X de 1461 KeV de energía.

El potasio, es la principal fuente natural de radiación interna.

#### 3.4.2 Potasio-40

El **Potasio-40** es un isótopo formado naturalmente. Fue formado junto con los otros elementos durante la creación de la tierra. Debido a su período largo de 1.26 mil millones años todavía está presente en la tierra.  $^{40}\text{K}$  es el único isótopo radiactivo natural del potasio y está presente en una cantidad de 0.0118% (abundancia isotópica) en este elemento natural. El potasio adicional incluye los isótopos  $^{39}\text{K}$  y  $^{41}\text{K}$  con abundancias de respectivamente el 93% y 6.9%. Un gramo de potasio natural contiene 31.6 Bq de  $^{40}\text{K}$ , por lo tanto la actividad de  $^{40}\text{K}$  se puede utilizar para determinar cuantitativamente el potasio total.  $^{40}\text{K}$  decae emitiendo rayos  $\beta^-$  a Calcio-40 estable con una probabilidad de la desintegración de 89% y a Argon-40 estable que emite rayos X en un índice del 11% (Ver Figura No. 4). La actividad de  $^{40}\text{K}$  puede ser determinada por detección de los rayos X con una energía de 1461 KeV. El potasio así como  $^{40}\text{K}$  está presente en las sustancias terrestres y biológicas, porque el potasio elemental es un macronutriente para las plantas. Por ejemplo, el cuerpo de una persona de 70 kilogramos contiene aproximadamente 140 g de potasio y así una actividad aproximada de 4000 Bq de  $^{40}\text{K}$ . Debido a su presencia en casi todos los alimentos este isótopo representa la proporción más grande de la carga de radiación que ocurre naturalmente con la ingestión de alimentos. (7)(16)

**Figura 4 : DECAIMIENTO RADIATIVO DEL POTASIO**



### 3.4.3 Requerimiento diario de Potasio:

Normalmente, la alimentación proporciona aproximadamente 3 gramos de potasio al día, cantidad que supera sobradamente las necesidades diarias. El Instituto Nacional de Nutrición “Salvador Zubirán” ( INNSZ ) hace las recomendaciones para distintas edades como se describe en la tabla 4. (25)

El exceso de potasio aportado por la alimentación es inmediatamente eliminado en un organismo sano.

**Tabla 4: Recomendación diaria de Potasio**

Edad	RECOMENDACIÓN
0 – 6 meses	500 mg/día
6 - 12 meses	700 mg/día
1-3 años	1000 mg/día
3-7 años	1400 mg/día
7-10 años	1600 mg/día
Mayores de 10 años y adultos	2000 mg/día

### 3.4.4 Trastornos producidos por falta de potasio

La falta de potasio, conocida médicamente por hipopotasemia, se manifiesta por apatía, gran lasitud en los músculos, fatiga intensa, parálisis de los miembros en forma de crisis brutal, desnutrición, adelgazamiento, etcétera.

Las pérdidas gastrointestinales anormales de K se producen en la diarrea crónica, abuso crónico de laxantes o diuréticos y vómitos.

La hipopotasemia grave (con un K plasmático  $<3$  mEq/l) puede producir debilidad muscular y conducir a parálisis e insuficiencia respiratoria. Otras disfunciones musculares consisten en calambres, fasciculaciones, hipoventilación, hipotensión.

Por otra parte, la fatiga no se limita, a veces, a los músculos estriados, que son los sometidos a la voluntad, sino que se extiende a los músculos lisos, que se encuentran en numerosos órganos de la vida vegetativa y entonces se registran pérdida de apetito, digestiones lentas y laboriosas, estreñimiento y otros trastornos intestinales. (26)

### 3.4.5 Exceso de potasio

El aumento de la concentración de potasio sérico por encima de 5,5 mEq/l es causada por un exceso de los depósitos de potasio corporal total o un movimiento anormal de salida de potasio de las células.

Aunque a veces se produce parálisis flácida, la hiperpotasemia suele ser asintomática hasta que sobreviene la toxicidad cardíaca.

No es posible sufrir exceso de potasio a causa del aporte alimenticio, ya que el organismo tiene la capacidad de absorber estrictamente la cantidad de potasio necesaria y desechar el sobrante.

El exceso de potasio se produce, cuando existe alguna perturbación en el mecanismo de eliminación. Se ha podido observar exceso de potasio, por ejemplo, en el curso de algunas enfermedades de riñón, con gran disminución de la cantidad de orina, así como a consecuencia de accidentes importantes y en grandes quemaduras.

### **3.4.6 Efectos terapéuticos del potasio**

Es común la deficiencia de potasio en los enfermos que están en coma diabético.

En la diarrea infantil, el potasio disminuye notablemente. En los pacientes tratados con cortisona, se produce a veces retención de sodio y pérdida de potasio. Tal vez el mayor peligro se produce cuando en algunas operaciones quirúrgicas la deficiencia del potasio se presenta sin llamar la atención del médico.

El nivel de potasio en la sangre depende también de las secreciones internas del cuerpo, en especial de las glándulas suprarrenales. Al aplicarse medicamentos a base de cortisona, se descubrió que a grandes dosis ejercían un efecto pernicioso en el nivel de potasio sanguíneo ya que produce una retención de sodio y una secreción de potasio. En algunos casos esto va seguido de presión sanguínea arterial muy baja y de gran debilidad.

También suelen producir pérdida de potasio los diuréticos. Otro tanto ocurre con los vómitos y en el aporte alimenticio insuficiente que se da a veces después de las operaciones quirúrgicas y que, ocasionando una hipopotasemia puede comprometer la recuperación del paciente acabado de intervenir.

En la parálisis periódica la enfermedad se manifiesta por la aparición de una parálisis flácida de los miembros, con desaparición de reflejos e imposibilidad de todo movimiento. Pero se ha solucionado administrando sales de potasio para que la parálisis desaparezca en breves días, sin dejar secuela alguna.

La administración de potasio, por vía parenteral, requiere una extrema precisión. Si la dosis es insuficiente, el efecto es casi nulo; si es excesiva, pueden lesionarse el corazón u otros órganos.

Por otra parte, salvo casos de extrema urgencia, puede lograrse el aporte de potasio por medios mucho menos arriesgados como una alimentación rica en potasio.

La diarrea infantil es una de las principales causas de mortalidad; los niños se deshidratan rápidamente. Los líquidos que se les dan por vía oral se pierden rápidamente. Los que se administran por vía endovenosa son más eficaces. Pero desde que se descubrió que en la diarrea el niño no pierde solamente líquido, sino también potasio y otros electrolitos, se han salvado muchas vidas con soluciones orales de electrolitos. (26)

### 3.4.7 GENERALIDADES DEL POTASIO : (27)

A continuación se enuncian algunas de las generalidades más importantes del potasio

**POTASIO 40**    **Símbolo**  $^{40}\text{K}$

**Abundancia natural** 0.0118 %

**Decae**  $\beta^-$  (1.32 Mev) (89 %)

**Modo de decaimiento** : captura electrónica (11 %)

**Modo de decaimiento** : rayos X

**Tiempo de vida media** :  $1.26 \times 10^9$  años

**Número de nucleones:** 40

**Numero de neutrones** : 21

**Masa atómica** : 39.963999

**POTASIO**

**Dosis letal** :  $2600 \text{ mg kg}^{-1}$

**Dosis tóxica** 4 g of KCl

**Tiene 3 isótopos naturales** ( $^{39}\text{K}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{41}\text{K}$ ) y **15 isótopos artificiales.**

**Su masa isotópica va del rango de 35 to 51**

**Su nombre original es Potassium en latin.**

**Su descubrió en Londres Inglaterra**

**Tiene abundancia de 21 000 ppm en la corteza terrestre**

**Tiene abundancia de  $5 \times 10^6$  p.p.m. en agua de mar**

**Se encuentran 140 g en una persona promedio de 70 kg**

**Distribución humana en sangre**  $1620 \text{ mg dm}^{-3}$

**Distribución humana en huesos** 2100 p.p.m.

**Distribución humana en hígado** 16000 p.p.m.

**Distribución humana en músculos** 16000 p.p.m.

**Tiene un rol esencial en los organismos vivos**

**Conductividad térmica** :  $102.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  at 300 K

**Volumen molar**  $45.36 \text{ cm}^3$

**Capacidad calorífica**  $29.58 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$  para el sólido a presión constante 0.1 MPa a 298.15 K

**Capacidad calorífica**  $20.786 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$  para el gas a presión constante 0.1 MPa a 298.15 K

**Calor de vaporización**  $77.53 \text{ kJ mol}^{-1}$

**Calor de fusión**  $2.40 \text{ kJ mol}^{-1}$

**Punto de ebullición** : 1047 K

**Punto de fusión** : 336.80 K

**Masa atómica relativa** 39.0983 en unidades de  $^{12}\text{C} = 12.000$

**Numero de protones** : 19

**Número de registro en el Chemical Abstracts** 7440-09-7

**Densidad** :  $862 \text{ kg m}^{-3}$  para el sólido a 293 K

**Densidad** :  $828 \text{ kg m}^{-3}$  para el líquido a 336.80 K de punto de fusión

**Su nombre y símbolo original es kalium en Griego .**

**Número atómico** : 19

**Reacciona violentamente con el agua .**

**Fue descubierto en** 1807 (aislado)

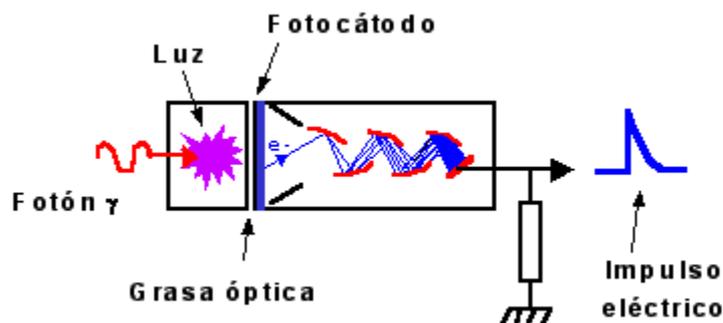
**Descubierto por** Sir Humphry Davy

### 3.5 DESCRIPCION Y FUNCIONAMIENTO DEL ESPECTROMETRO GAMMA:

#### 3.5.1 EQUIPO DE DETECCION:

Cada isótopo radiactivo emite radiación de energía característica; y gracias a que esta radiación es siempre la misma, se pueden identificar los átomos que las emiten. En la actualidad se utiliza un detector apropiado acoplado a un equipo que se conoce con el nombre de analizador multicanal, el cual, además de detectar la radiación emitida por cada isótopo radiactivo, puede determinar la energía de ésta. Cuando la radiación incide en el detector se produce una señal o pulso eléctrico, y el tamaño de este pulso depende de la energía absorbida por el detector. El analizador multicanal tiene una serie de pequeñas ventanas, denominadas canales; cada una de ellas acepta sólo los pulsos que poseen una altura determinada y los acumula. La información que se obtiene después de un cierto tiempo se traduce en un espectro de energías, que se construye haciendo una gráfica del número de cuentas acumulado en cada canal en función del número de éste, es decir, de la energía. (28)

El Potasio 40 al decaer a Argón 40 es un centelleador por lo que el rayo X emitido se convierte en luz



*Figura 5: Diagrama del Detector de centelleo y fotomultiplicador*

Los impulsos luminosos generados en el centelleador tienen que ser convertidos en una señal eléctrica y para ello se utiliza un tubo fotomultiplicador (PMT) dispositivo fundamental para la detección por centelleo. Es una válvula electrónica que consta de un fotocátodo en donde se produce una conversión de luz en electrones y a continuación mediante un proceso de multiplicación de electrones por medio de unos electrodos denominados dinodos, se obtiene un impulso eléctrico cuya altura es proporcional a la intensidad de la luz producida en el detector y como ésta a su vez es proporcional a la energía cedida por el fotón gamma, el impulso obtenido es proporcional a la energía absorbida en el cristal de centelleo.

Para su utilización, se coloca en contacto íntimo con el cristal de centelleo por medio de una grasa óptica para que la transmisión de luz entre el cristal y el fotomultiplicador sea óptima. (29)

En el detector de centelleo se aprovecha el hecho de que la radiación produce pequeños destellos luminosos en ciertos sólidos. Esta luz se recoge y transforma en un pulso eléctrico. El proceso de luminiscencia, o sea la absorción de radiación y la posterior emisión de luz, es muy rápido, disminuyendo el tiempo muerto.

El material que produce el destello se llama cristal de centelleo. Se selecciona para que tenga una alta eficiencia en absorber radiación ionizante y emitir luz (luminiscencia). Debe ser transparente para poder transmitir la luz producida, y debe

estar a oscuras para que la luz ambiental no le afecte. El material más empleado como cristal de centelleo es el yoduro de sodio activado con talio, NaI (Tl). Es de costo bajo y es muy estable. En la tabla 5 se muestran algunas de sus propiedades.

TABLA 5: PROPIEDADES DEL CRISTAL DE CENTELLEO

	INa(Tl)
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3.7
Higroscópico	Si
Constante tiempo extinción (ns)	230
Intensidad luminosa relativa al INa	100
Coefficiente de atenuación a 511 keV (cm <sup>-1</sup> )	0.34
Fotones de luz producidos/MeV	38000

### 3.5.2 FUNDAMENTO DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS PARTES DEL EQUIPO :

#### 3.5.2.1 Detector de centelleo:

El principio básico del aparato es la utilización de un material que produce una pequeña cantidad de luz cuando la radiación incide sobre el. El más utilizado es el cristal de yoduro sódico. La luz producida por la radiación -centelleo- es reflejada a través de una ventana, y es amplificada inmediatamente por un instrumento llamado tubo fotomultiplicador. La primera parte de este está fabricada de otro material, llamado fotocátodo, que tiene la característica única de emitir electrones cuando un fotón incide sobre su superficie. Estos electrones son transportados a través de una serie de placas, llamadas dinodos, mediante la aplicación de un elevado voltaje positivo. Cuando un electrón incide sobre un dinodo, se producen varios electrones, que se proyectan hacia el siguiente dinodo, donde vuelve a multiplicarse su número. Cuando los electrones abandonan el último dinodo de la serie, el pulso electrónico es miles de veces mayor que el original. Los electrones son entonces recogidos por el ánodo, que está conectado a un instrumento de medición calibrado. Este tipo de detectores son muy sensibles (30).

La base de la detección por centelleo es la emisión de luz provocada por la radiación al incidir sobre el material detector , con el que interactúa produciendo ionización y excitación atómica ó molecular : los átomos ó moléculas al desexcitarse emiten una fracción de la energía total absorbida en forma de un fotón de luz azul. Esta luz pasa a través del material centelleante y después por un conducto de luz hasta el tubo fotomultiplicador que convierte los centelleos de luz en señales eléctricas. Entonces la señal es procesada electrónicamente para amplificarla y almacenarla. El número de fotones producido es proporcional al número de radiaciones cuya energía es disipada en el interior del detector. El tamaño de los pulsos producidos por el fotomultiplicador es proporcional a la energía de la radiación. El Yoduro de sodio con trazas de Talio es una sustancia capaz de absorber energía y emitirla en forma de fotones de luz.

El Talio también llamado activador, se añade al cristal de NaI como impureza para :

- facilitar la excitación atómica del cristal; y
- reducir la energía del fotón emitido a niveles dentro del espectro visible ó ultravioleta donde pueden ser fácilmente amplificados por el PMT.

Este material resulta muy adecuado para la detección de rayos X y rayos  $\gamma$  , pues proporcionan buena eficiencia, buen rendimiento de luz y relación lineal entre la energía de la radiación incidente y la intensidad de luz.

La alta eficiencia para los rayos  $\gamma$  se debe a que los cristales son sólidos con densidad moderadamente alta y el yodo al poseer un alto número atómico refuerza el efecto fotoeléctrico. La mayor desventaja de los cristales de NaI(Tl) para la detección gamma es su pobre resolución energética. El tiempo muerto de este detector es aproximadamente 230 ns, el cual es largo comparado con otros materiales por lo que no es ideal para aplicaciones con intervalos de conteo altos ó experimentos que requieren una respuesta rápida. Los cristales de yoduro de sodio son muy higroscópicos, por lo que deben estar siempre cubiertos por contenedores de metal sellados. El tamaño del cristal es proporcional a su eficiencia, aunque mientras más grande sea aumenta la radiación de fondo detectada, aunque esto puede resolverse parcialmente mediante el blindaje. También puede aumentarse la eficiencia si el cristal de detección es del modelo tipo pozo.

### **3.5.2.2 Analizador Multicanal**

El principio del funcionamiento de un analizador multicanal (denominación abreviada MCA del inglés Multi-Channel Analyzer) consiste en clasificar pulsos de entrada según su amplitud en diferentes categorías, llamadas canales, y acumular separadamente el número de pulsos generados en cada canal. La figura 6 muestra un diagrama elemental de un analizador multicanal.

Lo constituyen:

- *Selector*: permite el pasaje de las señales que satisfacen algún criterio de aceptación, para su posterior análisis.
- *Convertidor Analógico-Digital* (denominación abreviada ADC del inglés Analog to Digital Converter): clasifica las señales de entrada, emitiendo un número proporcional a su altura.
- *Acumulador multicanal*: acumula los eventos detectados, clasificados por su altura. Esto constituye la salida del sistema y puede visualizarse en forma de espectro o mediante el trazado gráfico vía algún otro equipamiento externo.

El selector no es un instrumento separado sino que se encuentra integrado al convertidor analógico digital y las tres funciones se encuentran formando parte de un único instrumento.



*Figura 6: Diagrama de un analizador multicanal*

### **3.5.2.3 Selector**

El Selector está formado al menos por un conjunto analizador multicanal de altura de pulsos de entrada y una compuerta lineal, cuya función es la de permitir el pasaje de solo los pulsos de entrada cuya amplitud se encuentre dentro del rango de entrada del analizador. La importancia de esta selección reside en que los convertidores analógico-digitales suelen tener un tiempo muerto considerable, y resulta deseable que, para reducir el tiempo muerto total de una medición, no se analicen señales que no son de interés como el ruido de baja amplitud.

### **3.5.2.4 Descripción del detector de radiación gamma:**

El detector, es un detector de centelleo, que consiste básicamente en un cristal de NaI . Está rodeado por un cilindro de plomo para proteger el detector de la radiación de fondo. El detector de NaI es muy sensible, por lo que puede usarse con fuentes radiactivas débiles, como las emitidas por los alimentos.

La sustancia luminiscente que está dentro del cilindro es el NaI con impurezas de Talio, que produce centelleos al interactuar con los fotones.

Las radiaciones se encuentran con electrones pasándolos de un nivel a otro superior, produciendo energía en forma de rayos luminosos (centelleos). No se recoge la carga sino que se utiliza la desexcitación de las cargas.

Con este detector además de contar las radiaciones se sabe con qué energía llegan.

La espectrometría de radiación gamma consiste en observar el comportamiento de los fotones en función de su energía y se representa la energía que el fotón cede a los átomos del NaI con los que choca. (31)

Cuando la radiación gamma golpea el cristal se crea una luz débil que es recogida y convertida en pulsos eléctricos por un tubo fotomultiplicador (PMT). Los pulsos son amplificados. Un convertidor A/D convierte el tamaño de los pulsos en información digital que es procesada por el ordenador. El resultado se presenta en un diagrama de frecuencias de distribución de energía de fotones gamma detectados.

Los fotones gamma que llegan, depositan toda su energía, o parte de ella en los electrones del cristal de NaI, debido a colisiones (efecto Compton) o por efecto fotoeléctrico. Los electrones rápidos resultantes chocan con átomos de cristal, que son excitados y después desexcitados emitiendo fotones con una longitud de onda en la región de la luz visible. Los fotones alcanzan el fotocátodo de un tubo fotomultiplicador (PMT). Aquí los fotones provocarán la emisión de electrones por efecto fotoeléctrico. El número de electrones emitidos por el fotocátodo es proporcional a la energía de radiación gamma. Los electrones son acelerados en el tubo PM cara a la estructura de láminas metálicas (dinodos). En el primer dinodo un electrón emite más electrones. El conjunto de electrones es amplificado en cada dinodo. El conjunto de electrones resultante, da origen a un pulso eléctrico, en que la amplitud es directamente proporcional a la energía de radiación gamma. Por lo tanto, midiendo la amplitud, puede determinarse la energía de la correspondiente radiación gamma. Estos detectores solo se usan para medir energía gamma ya que es la que emite fotones.

Los pulsos eléctricos que llegan del PMT, pasan por el amplificador, luego son registrados por el ordenador y almacenados en un histograma atendiendo a su amplitud. Dicha amplitud es proporcional a su energía gamma el histograma reproduce la distribución de energía.

La información analógica (amplitud) debe ser convertida en información digital compatible con el ordenador. El circuito electrónico que realiza la conversión se llama convertidor A/D (analógico a digital).

Todos los pulsos que llegan al convertidor A/D, este hace una clasificación, se distribuyen los pulsos en diferentes canales, atendiendo a la altura del pulso. Los canales son proporcionales a la energía gamma. Cada canal corresponde con una energía. De este modo obtenemos un histograma de distribución de altura de pulsos de toda la radiación gamma detectada. Como la altura del pulso es proporcional a la energía, el histograma reproduce una distribución de las correspondientes energías gamma. (30)(31)

Cuando los rayos gamma son absorbidos por la materia, su energía es transferida al absorbedor, teniendo lugar los efectos fotoeléctrico, Compton y producción de pares descritos previamente. Si los rayos  $\gamma$  son absorbidos por el detector adecuado, esta energía es transformada en pulsos de corriente, cuya altura es proporcional a la energía del rayo absorbido. Si los pulsos son aceptados ó rechazados según su altura por un equipo electrónico adicional conectado al detector, son registrados solo aquellos de un determinado tamaño. En esta forma, registrando sucesivamente pulsos por rayos  $\gamma$  de una energía, podremos trazar un diagrama de energía de las radiaciones contra actividad detectada, el cuál mostrará picos en los lugares correspondientes a la energía característica de los rayos  $\gamma$  absorbidos por el detector. Estos picos son producidos por los rayos cuya energía total es absorbida, pero algunos otros ceden solo una fracción de la misma y escapan al sistema. Estas fracciones de energía absorbida son variables y producen pulsos más pequeños. Así una región ancha y baja aparecerá antes del pico correspondiente a una energía del rayo  $\gamma$  totalmente absorbida. Un diagrama de este tipo es llamada un espectro  $\gamma$ .

El análisis de altura de pulsos se realiza en un analizador multicanal, capaz de clasificar señales por su altura y registrarla de manera simultánea en muchos canales que comprenden una escala de energía para los rayos  $\gamma$  previamente fijada. El término eficiencia del detector se refiere a la relación entre el número de cuentas obtenidas en el sistema y el número de rayos detectados de cada energía y es específico para cada equipo.

Resumiendo, en la operación de un detector de centelleo tienen lugar los sig. eventos:

-La radiación nuclear es absorbida en el centelleador con el subsecuente emisión de fotones de luz.

-Estos fotones deben ser transmitidos con un razonable rendimiento al fotocátodo.

-La absorción de fotones de luz en el fotocátodo debe resultar en la emisión de electrones.

-Los pasos sucesivos del tubo fotomultiplicador, deben multiplicar suficientemente el número de electrones para proporcionar un pulso a la salida lo bastante grande para ser manejado en forma adecuada por el amplificador y el resto del sistema electrónico, a fin de poder relacionar número de pulsos ó cuentas con desintegraciones por unidad de tiempo, según la eficiencia del sistema. (32)

### **3.5.2.5 TIEMPO MUERTO**

Los fotones emitidos al ser muy veloces, llegan rápidamente al detector, provocando una caída brusca en el voltaje en una fracción de microsegundo. El equipo tarda cientos de microsegundos en restablecer las condiciones iniciales. Durante este tiempo, llamado tiempo muerto del detector, éste no puede producir nuevos pulsos.

El tiempo muerto del detector ( $t_m$ ) depende de su diseño, del voltaje aplicado, del circuito externo. En general es una cantidad dada y el usuario no tiene acceso a cambiar su valor. Sin embargo, cuando la rapidez de conteo con el detector es grande, pueden suceder muchos pulsos cercanos uno al otro. Entonces existe la posibilidad de que llegue una radiación antes

de que el detector se restablezca de la anterior, o sea dentro del tiempo muerto, en cuyo caso la nueva radiación no se registra, entonces la lectura será errónea.

Cuando esto sucede, se puede corregir la razón de conteo medida ( $m$ ) para obtener la razón de conteo real ( $n$ ). Esta sería la razón de conteo si no hubiese tiempo muerto.

$$n = \frac{m}{1 - mt_m}$$

Para verificar su validez, nótese que si  $t_m$  fuese cero,  $n$  sería igual a  $m$ . Desde luego,  $n$  siempre es mayor que  $m$ . Por otro lado, la corrección es mayor entre mayores sean la razón de conteo o el tiempo muerto. Para aplicar la fórmula, nótese también que las unidades deben ser congruentes. Por ejemplo, si las unidades de razón de conteo son cuentas/seg, el tiempo muerto debe expresarse en segundos. (7)

### 3.5.2.6 CONTENEDOR MARINELLI:

Cuando se trata de detectar emisores gamma a muy bajas actividades, son utilizados recipientes de plástico llamados vasos ó contenedor Marinelli.

Se le conoce como vaso Marinelli al contenedor en el que se deposita el analito y que es un recipiente con un espacio anular, esta fabricado de polipropileno grado alimenticio y tiene la forma de un cilindro en cuyo interior se deposita la muestra. Son recomendados en la detección de muestras radiactivas con baja actividad, en fases sólidas ó líquidas.(33)

### 3.5.2.7 ESTADISTICA DE RESULTADOS:

El decaimiento radiactivo es un proceso totalmente al azar, esto es el instante en el cual un núcleo va a decaer es independiente del decaimiento de otros núcleos, y solo puede ser precisado en términos de probabilidad. Es decir los resultados de la detección radiactiva tienen necesariamente una significación estadística, y el número de desintegraciones que con mayor probabilidad puede ocurrir en un tiempo dado se establece de acuerdo a reglas de estadística, habiendo siempre un margen de desviación ó error con respecto al valor más probable. O sea que en toda medición radiactiva no obtenemos un número de cuentas invariable y exacto en iguales periodos de tiempo, sino que solamente resulta posible establecer una rapidez de cuentas promedio, que viene a ser un adecuado reflejo del nivel de radiactividad medido. De esta manera, la estadística es utilizada en la estimación de errores debidos a la naturaleza al azar del decaimiento radiactivo, proporcionando al mismo tiempo los medio de reducirlos al mínimo.

Si una muestra radiactiva es contada durante una hora y el número de cuentas registrado es dividido entre 60, tendremos el resultado en cuentas por minuto, el cual es promedio de valores obtenidos 60 veces en un minuto de desintegración. Este resultado es más probable que corresponda al número de desintegraciones en minuto dado que si hubiéramos tomado las cuentas solo en un minuto en particular; para que las cuentas por unidad de tiempo sean un promedio seguro, es necesario obtenerlas en el período más largo posible, tomando en cuenta las condiciones de trabajo, la vida media de los radioisótopos y la actividad de las muestras; de esta manera disminuiríamos la variación estadística y la desviación estándar de nuestros resultados. Al hacer un gran número de mediciones radiactivas por minuto en una misma muestra y agrupando estas dentro de intervalos de valores pequeños, puede trazarse una gráfica de estos intervalos obteniéndose así un histograma en el que se observa una curva de distribución normal donde las cuentas por minuto promedio están en el intervalo que comprende mayor número de lecturas y que corresponde al centro del histograma.

Comúnmente se utilizan las leyes de distribución normal conocidas también como de Gauss,

en donde la incertidumbre se expresa como varianza ( $\sigma^2$ ) ó desviación estándar ( $\sigma$ ) que es la raíz cuadrada de la varianza.

En la práctica, una muestra radiactiva es contada solamente una vez, ó un número de veces relativamente pequeño que no permite una correcta distribución estadística. Sin embargo sabemos que en cada medida hecha existen 68.3 % de la probabilidad de que difiera del valor promedio por  $\sigma$  ó menos. Hay 95.5% de probabilidades de que difiera por  $2\sigma$  ó menos y 99.75 % de probabilidades de que difiera por  $3\sigma$  ó menos.

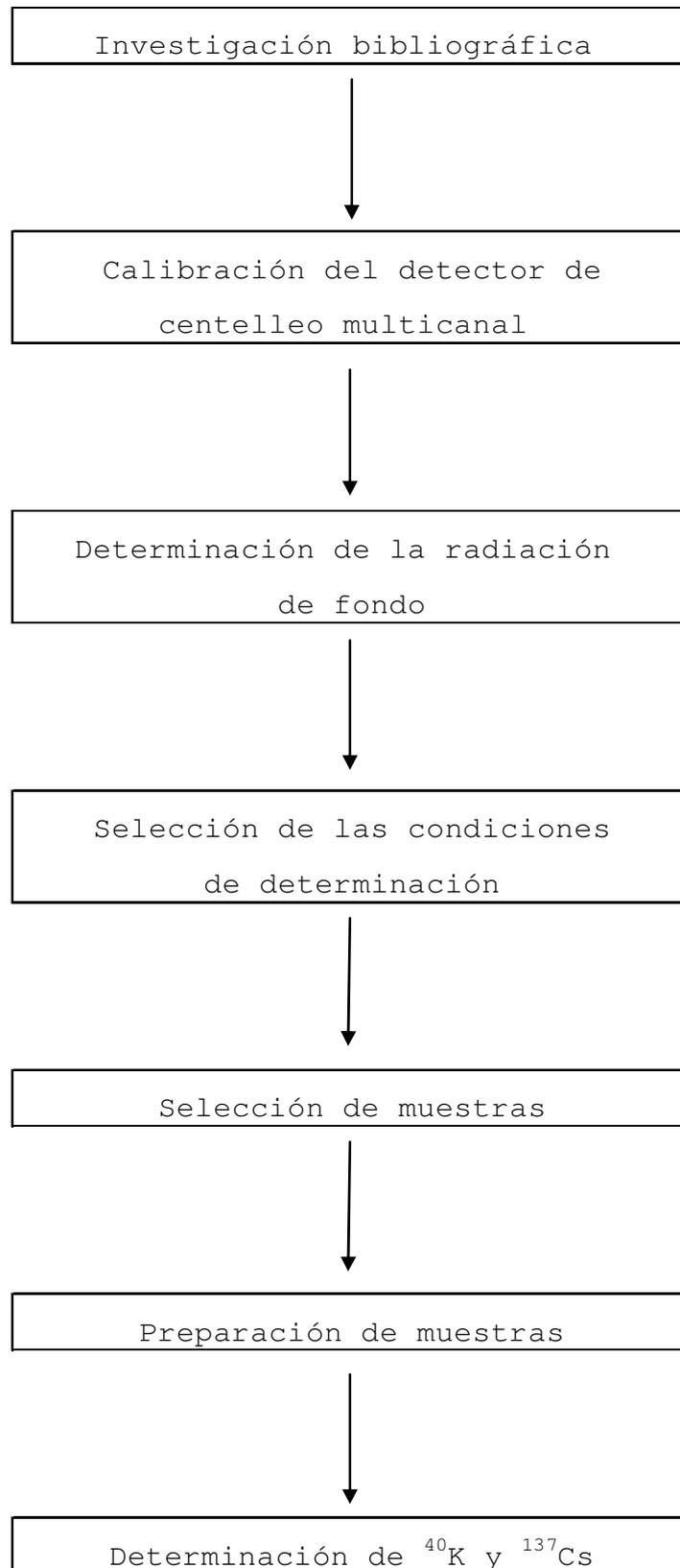
Para aplicar las reglas de la estadística al fenómeno de la radiactividad se debe considerar lo siguiente al tratar de interpretar las cuentas por unidad de tiempo obtenidas en la detección radiactiva.

- a) La desviación estándar es igual a la raíz cuadrada de las cuentas promedio de un gran número de determinaciones. Debido a que  $\sqrt{x}$  es tanto más pequeño comparado con  $x$ , cuanto  $x$  sea mayor, podemos suponer que las cuentas promedio estarán dentro de los límites  $x \pm \sqrt{x}$ , con aproximadamente una posibilidad en 3 de que estos límites sean excedidos.
- b) Aún cuando estos límites sean excedidos, el error como porcentaje de  $x$  será tanto más pequeño cuando  $x$  sea mayor. Las cuentas obtenidas deben ser tan grandes como sea practicable (en tiempos de detección relativamente largos y con la única restricción de la vida media del radioisótopo en medición) para lograr cuentas por unidad de tiempo tan cercanas a un valor promedio como sea posible. En la práctica 10 000 cuentas se consideran adecuadas para introducir un error de un 1 % en relación al valor promedio, que en los casos más desafortunados pudiera extenderse a 2 %, 3 %, 4 %.

(7)

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 4.1 Diagrama general del estudio:



## **4.2 METODO:**

El método de espectrometría gamma para muestras con bajo fondo de radiación es el adecuado para determinar radiación en alimentos, ya sea la natural proveniente de  $^{40}\text{K}$  ó por fuentes artificiales como  $^{137}\text{Cs}$ . (34)

### **4.2.1 EQUIPO:**

El espectrómetro gamma utilizado en este estudio está ubicado en el Laboratorio de Química inorgánica y Nuclear del edificio “D” de la Fac. de Química. UNAM

El sistema de detección de la actividad del  $^{40}\text{K}$  es a través de un detector de centelleo de NaI (TI) con diseño tipo pozo, acoplado a un analizador multicanal cuyas características son las siguientes:

Dimensiones del cristal de centelleo NaI(Tl) : 3” x 3”

A continuación se enlistan los componentes del espectrómetro gamma, las marcas, y procedencia.

#### **-ANALIZADOR MULTICANAL:**

Marca : Labtech  
Fabricante : Bicron NE  
Lugar de Procedencia : Ohio, USA

Canales de detección del analizador multicanal: 2084

#### **-BLINDAJE:**

-El equipo está rodeado por un blindaje de plomo para reducir la radiación de fondo, cuyas características son:

Marca : Myma  
Fabricante : Medidores Industriales y Médicos S.A. de C.V.  
Lugar de procedencia : México

#### **-COMPUTADORA:**

-El equipo está acoplado a una PC en la que se realiza el procesamiento de datos  
Software: Programa Maestro de detección radiactiva.

Fabricante: EG G ORTEC  
Lugar de procedencia: Tennesse, USA  
Versión de programa: 1997

Ver fotografías del equipo utilizado en el anexo I

## 4.2.2 MATERIAL

- Balanza Granataria .Marca Ohaus
- Espátulas
- Procesador de alimentos marca Moulinex
- Vasos Marinelli
- Cuchillo
- Estándar multinúclido
- Material en general de laboratorio

### **Descripción de:**

#### **a) Vasos Marinelli:**

Las especificaciones de proveedor de los vasos Marinelli usados son 12 cm de diámetro y 11.5 cm de altura corroborado con Vernier.

Capacidad volumétrica es de 500 mL. de acuerdo a especificaciones de proveedor.

**Modelo:** γ beaker 533-N.

**Proveedor:** Ga-ma and associates incorporated

**Procedencia:** USA

Como manera de ilustración en el anexo I se muestran una fotografía del Marinelli en el pozo de detección del espectrómetro gamma y otra con el Marinelli con muestra.

#### **b) Estándar Multinuclido:**

A continuación se enuncian las características del estándar multinúclido que se usó en la calibración del detector de centelleo multicanal.

Proveedor :	Isotope Products Laboratorios
Std. No.:	733-99
Fecha de calibración:	15-Nov-00
Procedencia:	Burbank, Cal. USA

El certificado de proveedor del estándar multinúclido se puede ver en el Anexo II, al final del presente trabajo.

## 4.3 CALIBRACION DEL DETECTOR DE CENTELLEO MULTICANAL:

El sistema presenta diferentes eficiencias en la detección de radiaciones electromagnéticas dependiendo de la energía de las mismas, pues las radiaciones de menor energía tienen mayor probabilidad de disiparla en el detector, obteniéndose mejores eficiencias en la detección que para radiaciones de mayor energía.

La eficiencia en la detección de la radiactividad debe ser calculada para cada sistema en particular, para lo cual se usó un estándar comercial que contiene diferentes radionúclidos emisores gamma de distintas energías y actividades.

Los componentes a analizar son  $^{137}\text{Cs}$  que emite una señal a 662 KeV y  $^{60}\text{Co}$  que emite 2 señales a 1173 y 1333 KeV

### Procedimiento:

El estándar multinúclido, está encapsulado en un contenedor Marinelli Mod. 533N que se colocó en el pozo de detección. Este espectro de emisión se toma con un solo minuto de detección.

Tabla 6: Datos y resultados de la calibración del detector de centelleo

	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co	<sup>60</sup> Co
Actividad inicial (μCi) (15-Nov-00)	0.2536 μCi	0.2933 μCi	0.2933 μCi
Actividad inicial (dps) (15-Nov-00)	9383.2	10852.1	10852.1
Energía (KeV)	662	1173	1333
Tiempo de vida media	30.17 años	5.24 años	5.24 años
Tiempo transcurrido a la determinación	3.72 años	3.72 años	3.72 años
Decaimiento gamma	0.85	0.9986	0.9998
Actividad actual dps (2-Ago-04)	7318.97	6903.51	6924.29
Cuentas obtenidas (cps)	395.22	165.68	159.25
Eficiencia = cpm/dpm	0.054	0.024	0.023
% Eficiencia	5.4	2.4	2.3

En la tabla 6 se presentan:

- En la primera fila los datos de la actividad inicial de los radionúclidos en μCi. Los datos se encuentran en el certificado de proveedor que se puede ver en el Anexo II
- En la siguiente fila está el resultado de la actividad inicial en dps , ya que  $1 \mu\text{Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{ dps}$  por lo que se hizo la sig. Conversión, tomando como ejemplo el <sup>137</sup>Cs.  
 $0.2536 \mu\text{Ci} (3.7 \times 10^4 \text{ dps} / 1 \mu\text{Ci}) = 9383.2 \text{ dps}$
- La energía de detección para cada radionúclido que son <sup>137</sup>Cs a 662 KeV; <sup>60</sup>Co a 1173 y 1333 KeV.
- el tiempo de vida media de cada radionúclido que son <sup>137</sup>Cs que tiene 30.17 años de vida media y <sup>60</sup>Co 5.24 años.
- El tiempo transcurrido al día de calibración: del 15 de Nov de 2000 al 2 de agosto de 2004: 3.72 años
- Decaimiento Gamma: como ejemplo; en el caso del <sup>137</sup>Cs, solo el 85 % de los núcleos decaen emitiendo rayos γ, por lo que solo el 85 % de la actividad calculada es detectada
- cuentas por segundo detectadas por el sistema para cada radionúclido.

- Actividad actual que se calculó de la sig. manera para el Cesio- 137 (actual se considera en el momento de la calibración de la eficiencia del sistema).
- los cálculos de actividad actual y la eficiencia en la detección de cada radioisótopo se calculó como se muestra a continuación usándose como ejemplo el  $^{137}\text{Cs}$ .

De acuerdo a la fórmula de decaimiento radiactivo que vimos en los antecedentes:

$$A_{\text{actual}} = A_{\text{inicial}} e^{-\lambda t} ;$$

$$A_{\text{actual}} = A_{\text{inicial}} e^{-(0.693 / t_{1/2} \times t)} \times \text{Dec.}\gamma ;$$

$$A_{\text{actual}} = 9383.2 \text{ dps} \times e^{-(0.693 / 30.17 \times 3.72)} \times 0.85 = 7318.97 \text{ dps}$$

$$A_{\text{actual}} = 7322.517 \text{ dps}$$

Eficiencia (E) = cuentas obtenidas /actividad actual (cps/ dps)

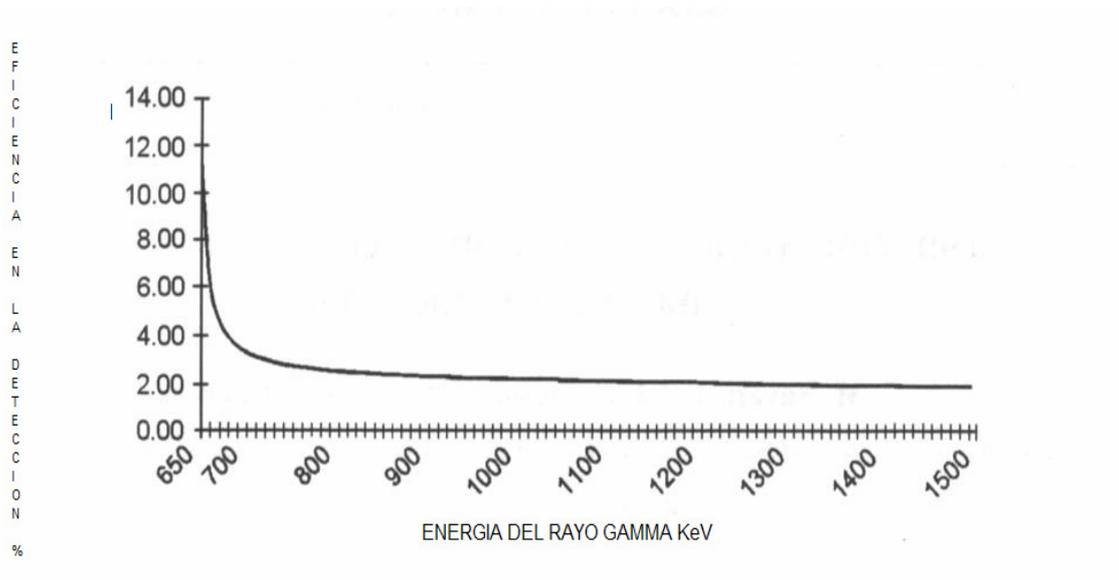
$$E = 395.22 / 7318.97 = 0.054$$

$$\% E = E \times 100$$

$$\% E = 0.054 \times 100 = \underline{5.4 \% \text{ de eficiencia en el sistema de detección para } ^{137}\text{Cs}}$$

Los 3 valores de eficiencia en la detección obtenidos y cuyo resultados están en el cuadro anterior se pueden graficar vs. las 3 energías de los estándares quedando de la sig. manera:

**Figura 7: Gráfica de Energía gamma vs Eficiencia en la detección, obtenida con los estándares de  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$**



Para obtener la eficiencia en el sistema de detección para potasio 40 en nuestro sistema de detección es necesario extrapolar en la grafica a 1461 KeV de energía.

$$\text{Ef. } [\%] = 2.22 \% \quad (\text{Extrapolación a } 1461 \text{ KeV})$$

**Este valor de 2.22 % es la eficiencia en la detección en nuestro sistema de detección en particular para la longitud de onda de 1461 KeV que corresponde a la del <sup>40</sup>K.**

#### **4.4 DETERMINACION DE LA RADIACION DE FONDO:**

En el caso de la determinación de la actividad del <sup>40</sup>K en alimentos representa niveles muy bajos de radiactividad y que se aproximan a la radiación de fondo , por lo que es necesario determinarlo experimentalmente en la energía de emisión del radioisótopo de interés , es decir 1461 KeV.

Al medir la radiactividad, la radiación de fondo debe ser medida en las condiciones de operación seleccionadas y sustraída de las lecturas, representando la actividad de la muestra más la radiación de fondo, esto representa una corrección que siempre debe hacerse y cobra especial importancia al tratarse de medidas de bajas actividades como en este caso. En el detector de centelleo, el tamaño de los pulsos es directamente proporcional a la energía de la radiación que originalmente incide en el detector.

#### **Procedimiento:**

Se hicieron 3 determinaciones a 22, 64 y 22 horas de tiempo, es decir 108 horas de detección.

Se colocó el vaso Marinelli vacío en el pozo de detección y se hicieron los 3 conteos del fondo a 1461 KeV.

Los datos experimentales para la obtención de un valor promedio del fondo en nuestro sistema de detección son los siguientes:

**Tabla 7: Resultados en la determinación de la radiación de fondo**

Resultado del conteo e incertidumbre	Tiempo Vivo	Tiempo de detección (Horas)	( Conteo ) cps
18827± 721 cp	79132 s	22	0.238 ± 0.009
53176 ± 1025 cp	229616 s	64	0.231 ± 0.004
17810 ± 739 cp	77389 s	22	0.230 ± 0.009

Para conocer las cuentas obtenidas por unidad de tiempo en la determinación usamos la sig. fórmula:

Cuentas obtenidas / tiempo vivo = cuentas por segundo (cps)

Tomemos como ejemplo el primer resultado de la tabla 7:

$$18827 \text{ cp} / 79132 \text{ s} = 0.238 \text{ cps}$$

Promedio de los 3 resultados:  $0.233 \pm 0.0073 \text{ cps}$

Tiempo total de detección: 108 Hrs.

Valor del fondo:  $0.233 \text{ cps} \pm 0.0073 \text{ cps}$

**Incertidumbre:**

La incertidumbre en este caso es un valor que el programa “Maestro” proporciona en cada determinación con una confiabilidad del 99.75 %

Para calcular la incertidumbre en la medición por unidad de tiempo se usó la sig. fórmula:  
Cuentas obtenidas en la incertidumbre/ tiempo vivo = cps de incertidumbre

$$\pm 721 \text{ cp} / 79132 \text{ s} = \pm 0.009$$

Es decir el conteo en el primer caso es de  $0.238 \text{ cps} \pm 0.009$

**Grado de incertidumbre en el fondo:**

Se calculó con la sig. fórmula:

$$\% \text{ de Incertidumbre} = \sigma \times 100 / \text{promedio}$$

$$\sigma = 4.35 \times 10^{-3}$$

$$\% \text{ de Incertidumbre} = 4.35 \times 10^{-3} (100) / 0.233 = 1.87 \%$$

Por lo tanto: 1.87 % de grado de incertidumbre en el fondo.

#### 4.5 MUESTRAS ESTUDIADAS:

A continuación se enlistan los alimentos analizados demostrando también de que marca comercial se obtuvieron ó fuente de procedencia:

ALIMENTO	MARCA O PROCEDENCIA
Yema de Huevo	Alvisa
Clara de Huevo	Alvisa
Fécula de Maíz	Maicena
Harina de Maíz Nixtamalizado	Maseca
Harina de Trigo Refinada	Tres Estrellas
Harina de trigo integral	Nutrisa
Harina de Arroz	Tres Estrellas
Crema de Leche	Marca Aguascalientes
Leche descremada	Marca Aguascalientes
Arroz Integral	Marca SOS
Arroz pulido de grano largo ( <i>Oryza sativa L.</i> )	Marca SOS
Arroz Salvaje ó wild rice ( <i>Zizania sp.</i> )	Marca SOS
Plátano dominico ( <i>Musa sapientum</i> )	Granel
Jitomate ( <i>Lycopersicum Esculentus mill.</i> )	Granel
Papaya Maradol ( <i>Carica papaya</i> )	Granel
Miel de abeja	Carlota
Miel de Abeja	Granel de Cuautla, Mor.
Nuez de Castilla ( <i>Carya illinoensis</i> )	Marca San Lázaro
Amaranto	Nutrisa
Jugo de Naranja	Granel
Naranja entera	Granel
Grano de Café	Coatepec, Ver.
Café (Bebida )	
Manzanilla ( <i>Chamomilla Matricaria</i> )	Pastora
Té de Manzanilla	

#### 4.6 SELECCIÓN DE CONDICIONES DE DETERMINACION:

Muestras estudiadas y acondicionamiento de las muestras

a) El número de muestras:

Se han seleccionado 25 diferentes alimentos para este estudio. En cada alimento se hizo una sola muestra y un solo análisis al ser una macromuestra (de aproximadamente 500 ml dependiendo de la densidad del alimento) analíticamente se considera que es representativa y homogénea para el método de espectrometría gamma.

Como ya mencionamos en los antecedentes, en la práctica, una muestra radiactiva es contada solamente una vez, ó un número de veces relativamente pequeño que no permite una correcta distribución estadística, en una sola medida existen 68.3 % de nivel de confianza en el resultado si consideramos  $\bar{x} \pm \sigma$  para n determinaciones. Sin embargo el programa "Maestro" proporciona un valor  $\bar{x} \pm 3\sigma$  correspondiente a 99.75 % de grado de confianza; y este será el caso en los resultados de cada una de nuestras muestras sujetas a estudio.

b) tiempo de conteo:

Al contar en cada caso con una macromuestra se hará un conteo de 22 horas (79 200 s) de tiempo para cada alimento, ya que es un tiempo de determinación que analíticamente se considera suficiente para hacer que el error estadístico en la determinación sea el menor posible tomando en cuenta que se hará una sola determinación para cada muestra, siendo este un trabajo preeliminar para determinar la variabilidad del equipo que no debe sobrepasar al 10 % de grado de incertidumbre en cada muestra.

c) Condiciones de análisis:

En cada muestra los alimentos se analizarán en base húmeda, al no determinar la humedad de cada alimento no se hará corrección en base seca, tomando en cuenta que este es un estudio preeliminar. Este trabajo sentará las bases para determinar las condiciones de análisis en los alimentos seleccionados y cabe mencionar que es un método aún no validado y que será tema de otro estudio.

En cada muestra solo se usará la parte comestible. Las muestras serán homogéneas y libre de partículas visibles y/ó material extraño.

La detección se realiza a 1461 KeV para el  $^{40}\text{K}$  y a 662 KeV para el  $^{137}\text{Cs}$

## **ACONDICIONAMIENTO DE MUESTRAS:**

En todos los casos los alimentos se analizaron en Base Húmeda.

En cada caso y por el origen del alimento se considero su acondicionamiento de acuerdo a las características del mismo para su análisis, a continuación se describe la preparación de la muestra para cada análisis y en general se puede ver el diagrama de proceso 4.7 en la pág. 46.

Clara de Huevo: se separaron las claras de la yema del huevo y se procedió a tarar el Marinelli vacío, a continuación se añadieron las suficientes claras de huevo al Marinelli para su análisis y se procedió a tarar con muestra; por diferencia se determinó el peso de la muestra (471.7 g), se le colocó la tapa y se colocó en el espectrómetro programándose a 22 horas que equivale a 79 200 s de tiempo.

De similar manera se preparó la muestra de Yema De Huevo. En este caso se decidió analizar la clara y la yema por separado y no usar el huevo completo.

Las siguientes muestras se añadieron tal cual al vaso Marinelli para su análisis.

Fécula de Maíz

Harina de Maíz Nixtamalizada

Harina de Trigo refinada

Harina de Trigo Integral

Crema

Leche descremada

Arroz Integral

Arroz Pulido de grano largo

Harina de arroz

Arroz Salvaje

Miel de abeja marca Carlota

Miel de abeja

Nuez de Castilla

Amaranto

Jugo de Naranja

Grano de café

Manzanilla

Plátano dominico: Para acondicionar la muestra para su análisis los plátanos dominicos se les quitó la cáscara y se homogenizaron hasta hacer un puré con el procesador de alimentos y se añadió al Marinelli.

De similar manera se procedió con la papaya Maradol y la naranja entera para analizar solo la parte comestible libre de piel y semillas.

Jitomate: Para acondicionar la muestra para su análisis los jitomates se molieron enteros en el procesador de alimentos ya que en su totalidad son comestibles, hasta hacer un puré y se añadió al Marinelli limpio.

Infusión de café: Se preparó la infusión de acuerdo a la preparación normal de café, cuantificando las cantidades usadas fueron 43 g de café en grano tostado y molido y el agua

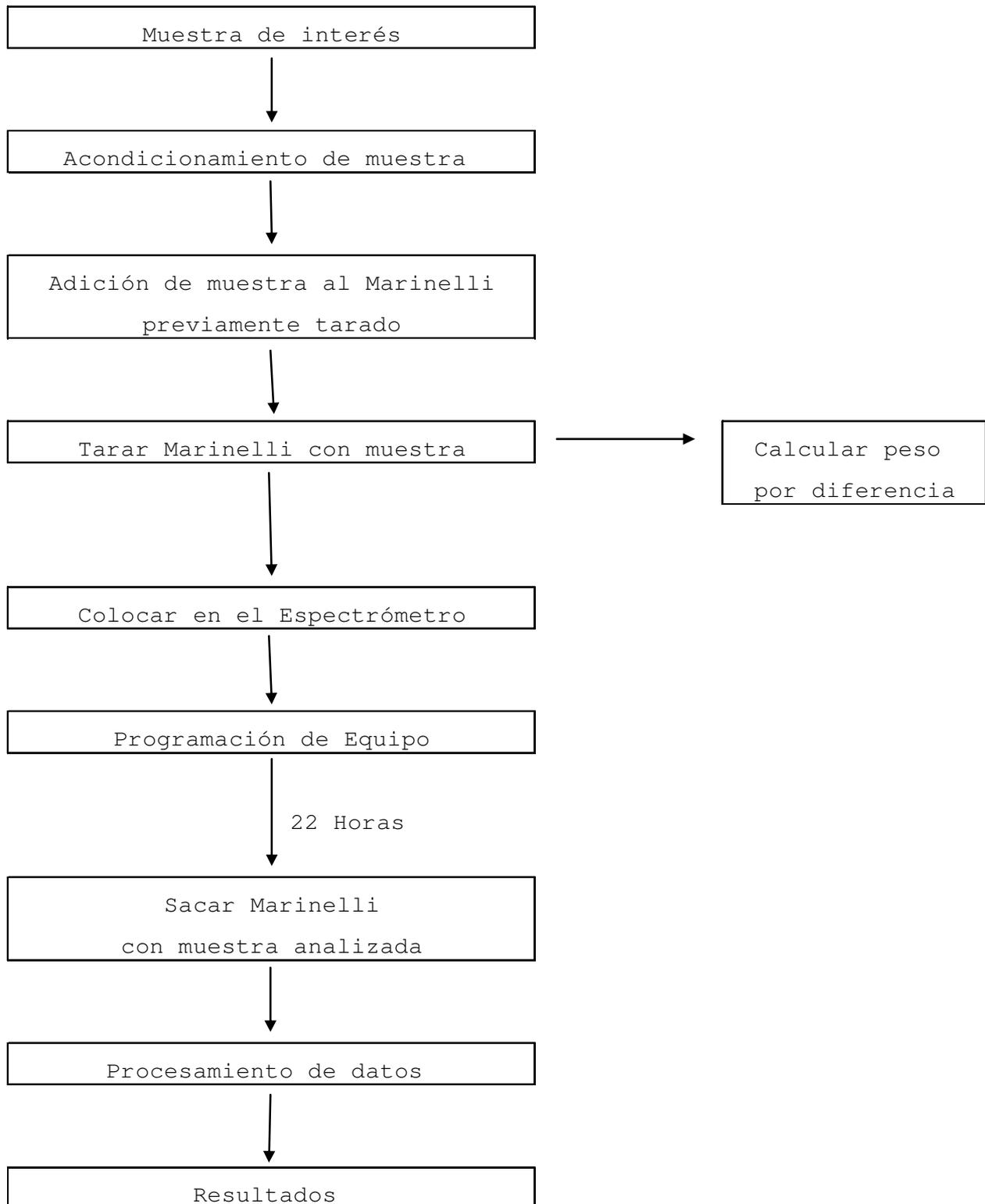
deionizada para su preparación fueron 500 mL. La infusión resultante a temperatura ambiente, se colocó en el Marinelli.

**Infusión de manzanilla:** Se preparó la infusión de acuerdo a la preparación normal del té, cuantificando las cantidades usadas fueron 28.2 g de Manzanilla y el agua deionizada para su preparación fueron 1000 mL.

En cada caso la muestra obtenida se coloca en el Marinelli el cual tiene una marca de aforo a 500 mL. Se coloca la tapa, se pesa y por diferencia se conoce la cantidad de muestra analizada y se coloca en el pozo de detección, se programa el equipo en cada caso a 22 horas y transcurrido este tiempo el equipo nos da las cuentas obtenidas en el lapso de tiempo real de detección del equipo.

A continuación se presenta el diagrama general de actividades en la detección de los radioisótopos de interés en este estudio  $^{40}\text{K}$  y  $^{137}\text{Cs}$ :

#### 4.7 Diagrama de Proceso



#### 4.8 CALCULOS PARA DETERMINAR LA ACTIVIDAD DEL $^{40}\text{K}$ Y CONCENTRACION TOTAL DE POTASIO EN ALIMENTOS:

ACTIVIDAD DEL  $^{40}\text{K}$ :

De acuerdo a lo revisado en con anterioridad en este trabajo conoceremos la actividad del  $^{40}\text{K}$  presente en algunas muestras de alimentos, para lo cuál necesitamos conocer la actividad presente en el radioisótopo por gramo de potasio elemental:

Como ya revisamos en los antecedentes y de acuerdo a la ley de decaimiento:

$$A = \lambda N \quad ; \quad \text{donde} \quad \lambda = \ln 2 / t_{1/2}$$

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

La abundancia isotópica del  $^{40}\text{K}$  es de 0.0118% que como ya hemos mencionado solo el 0.0118 de 100 átomos de potasio tiene un decaimiento gamma.

Por lo que:

$$N = 1 \text{ g } K_{\text{elemental}} \times \frac{1 \text{ mol } K}{39.1 \text{ g } K} \times \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ at. de } K}{1 \text{ mol } K} \times \frac{0.0118 \text{ at. de } ^{40}\text{K}}{100 \text{ at. de } K}$$

$$N = 1.81677 \times 10^{18} \text{ átomos de } ^{40}\text{K} / \text{ g de } K_{\text{elemental}}$$

Donde : 39.1 g es el peso molecular del potasio  
 $6.02 \times 10^{23}$  es el número de Avogadro.

El tiempo de vida media del potasio-40 es de  $1.26 \times 10^9$  años, si lo expresamos en segundos.

$$1.26 \times 10^9 \text{ años} \times \frac{365 \text{ d}}{1 \text{ año}} \times \frac{24 \text{ H}}{1 \text{ d}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ H}} = 3.9735 \times 10^{16} \text{ s}$$

Por lo tanto :

$$A = \frac{(0.693)(1.81677 \times 10^{18} \text{ át. de } ^{40}\text{K} / \text{ g de } K)}{3.9735 \times 10^{16} \text{ s}}$$

$$A = 31.685 \text{ dps} / \text{ g } K ; \text{ es decir}$$

$$A = 31.685 \text{ Bq} / \text{ g } K$$

Que es la actividad del potasio elemental por gramo

Para calcular la actividad específica del Potasio 40 en la muestra se usó la sig. fórmula :

$$A_e = \frac{(C_m - C_f)}{E \times \text{Dec. } \gamma \times W_M}$$

$$A_e = \frac{(C_m - C_f) [\text{cps}]}{0.022 [\text{ctas.} / \text{rad. } \gamma] \times 0.11 [\text{rad } \gamma / \text{des}] \times W_M [\text{g}]} = \text{dps} / \text{ g} = \text{Bq} / \text{ g de alimento}$$

Donde:

(  $C_m - C_f$  ) : Son las cuentas obtenidas para la muestra ( $C_m$ ) mediante el programa y se dividen entre el tiempo de detección y las expresamos en cuentas por segundo (cps) , de las cuáles se sustraen las cuentas obtenidas en la detección del fondo radiactivo ( $C_f$ ).

E : Eficiencia en la detección para nuestro sistema = 0.0222 ctas. / rad.  $\gamma = 2.22 \%$

Dec.  $\gamma$  : Decaimiento gamma ; en la actividad detectada para el potasio solo el 11 % de los átomos de potasio decaen por captura electrónica emitiendo rayos X de 1461 KeV y que pueden ser analizados por el instrumento empleado .

$W_M$  :Peso de la muestra [ g ]

Para calcular el % de Potasio en la muestra se utilizará la sig. fórmula :

$$A_e [\text{Bq/g muestra}] / A [\text{Bq/g } K_{\text{elemental}}] \times 100 = \% \text{ de Potasio en muestra}$$

Donde :

$A_e$  = Actividad específica del alimento

$A$  = Actividad por gramo de potasio elemental = 31.685 dps / g K

Con el objeto de simplificar los cálculos en la ecuación podemos sacar como factor las constantes expresadas para este estudio.

$$F = 100 / 0.0222 \times 0.11 \times 31.685 = 1304.16$$

$F = 1304.16$  ; por lo tanto :

$$\% K = \frac{(C_m - C_f) \times F}{W_M}$$

$$\% K = \frac{(C_m - C_f) \times 1304.16}{W_M}$$

En la tablas 8 y 9 se muestran los datos y resultados del presente estudio; cabe mencionar que no hubo detección de  $^{137}\text{Cs}$  en ninguno de los 25 elementos analizados.

En los productos de infusión como el té y el café se tomo en cuenta el agua adicionada para los cálculos , en todos los casos se pesaron las muestras contenidas en el contenedor Marinelli y por lo tanto se expresan por gramo en la tabla de resultados 8.

## 4.9 RESULTADOS.

Para una mejor visualización los resultados de este estudio se resumen en las tablas 8 y 9 en las págs. 54 y 55.

- En la primera columna de ambas tablas se enuncia como muestra el alimento analizado, en total se analizaron 25 muestras por el método de espectrometría gamma anteriormente descrito.
- En la segunda columna contiene el peso de la muestra depositada en el vaso Marinelli, en cada caso el peso se calculó por diferencia del Marinelli con muestra menos el peso del Marinelli vacío. Las diferencias en el peso de las muestras se debe a la densidad de cada alimento como ya explicamos anteriormente; siendo el de mayor peso la miel de abeja marca “Carlota” (604.4 g) y el de menor peso es el amaranto (48.6 g), en todos los casos se usó el mismo volumen de muestra.
- El tiempo de detección de la muestra que como ya establecimos es de 22 horas en cada caso, es decir de 79 200 segundos.
- En la columna de resultado se refiere al número de cuentas detectadas en el sistema en el tiempo de determinación, este resultado lo proporciona automáticamente el sistema mediante el programa “Maestro” de detección radiactiva y de la misma manera proporciona el error estadístico en la determinación. En esta tabla se presentan los resultados obtenidos en la determinación en la energía de 1461 KeV correspondiente al  $^{40}\text{K}$ . No hubo detección en ningún alimento de  $^{137}\text{Cs}$  correspondiente a 662 KeV, esto es un resultado esperado y congruente ya que de los 2 radioisótopos esperábamos encontrar solo  $^{40}\text{K}$  ya que es de ocurrencia natural y el  $^{137}\text{Cs}$  es indicativo de contaminación radiactiva por fuentes artificiales ya que es un producto de fisión del  $^{235}\text{U}$ , por lo que no debe estar presente en ningún alimento aunque la legislación internacional permiten 110 Bq/Kg de alimento de este radioisótopo. Esto es un indicativo de la ausencia de contaminantes radiactivos por fuentes artificiales lo que indirectamente nos indica un adecuado manejo en plantas nucleares y sus desechos radiactivos.

Ambos radioisótopos emiten radiación electromagnética aunque de distinta energía, ya que el  $^{40}\text{K}$  emite rayos gamma de 1461 KeV y el  $^{137}\text{Cs}$  emite rayos gamma de 662 KeV. Ambos emisores de energía ionizante pueden causar daño a los seres vivos, especialmente el  $^{137}\text{Cs}$  ya que además de ser un contaminante, emite rayos gamma con una energía menor a la de los rayos gamma del  $^{40}\text{K}$  y al ser de menor energía son más penetrantes causando una ionización más localizada y puede producir más daño. Al ingerirse el  $^{137}\text{Cs}$  y el  $^{40}\text{K}$ , se distribuyen en todo el cuerpo depositándose en los músculos, esta distribución generalizada hace que sus efectos en el organismo sean similares a los de una exposición por fuentes externas, al no depositarse en ningún órgano ó tejido específico, la dosis total se encuentra distribuida por todo el cuerpo, esto favorece la probabilidad de algunos efectos como acortamiento de la vida, daños genéticos, teratogénicos ó carcinogénicos, esto por supuesto depende de otros factores como la dosis umbral administrada.

Las determinaciones realizadas en este estudio no son suficientes para evaluar un posible daño biológico, ya que sería necesario evaluar las dosis de exposición y dosis absorbida por el organismo.

Si consideramos que la mayoría de los alimentos contienen potasio, estamos ingiriendo de potasio radiactivo y esto no puede evitarse.

- El tiempo vivo es el tiempo real de detección proporcionado por el programa “Maestro” .
- En la columna de cps (cuentas por segundo) son las cuentas obtenidas en detección por unidad de tiempo que se calcularon de la sig. manera; por ej. para clara de huevo: El resultado fue de  $20499 \pm 752$  cuentas por 70915 segundos de tiempo vivo, por lo que para expresarlo por unidad de tiempo usamos la sig. fórmula:

$$\text{Cps} = \frac{\text{Cuentas obtenidas} \pm \text{incertidumbre}}{\text{tiempo vivo}}$$

$$\text{Cps} = \frac{20499 \pm 752 \text{ cuentas por}}{70915 \text{ s}} = 0.289 \text{ cps} \pm 0.0106$$

- En la columna de cps- fondo , nos da el conteo real de cada muestra ya que hicimos la corrección del fondo radiactivo ; si recordamos que en la determinación del fondo obtuvimos  $0.233 \pm 0.007$  el cálculo es ejemplificado con el resultado de la clara de huevo:  
 $(0.289 \text{ cps} \pm 0.0106) - (0.233 \pm 0.007) = 0.056 \pm 0.0176$  cps por muestra de clara de huevo corregida por fondo.

La tabla 9 de la pág. 55 es una continuación de los datos y resultados del presente estudio, en el que por columna se describe:

- Tiempo Muerto :

El tiempo muerto es la diferencia entre el tiempo de prueba – el tiempo vivo, si seguimos con el ejemplo de la clara de huevo:

$$t_{\text{muerto}} = t_{\text{de prueba}} - t_{\text{vivo}}$$

$$t_m = 79\,200\text{ s} - 70\,915\text{ s} = 8\,285\text{ s}$$

- El grado de incertidumbre de la muestra se refiere a la incertidumbre en la detección solo de la muestra, esto es debido a que como recordaremos el decaimiento radiactivo es un proceso al azar sujeto a las leyes de la probabilidad.

Si continuamos con el ejemplo de la clara de huevo:

Recordemos que para calcular la incertidumbre de la muestra se divide el error estadístico (proporcionado por el programa “Maestro” que posee una desviación máxima de un 2% con un 99.75 % de nivel de confianza) entre las cuentas obtenidas que multiplicado por 100 nos da el grado de incertidumbre en la detección de la muestra.

$$\text{Grado de incertidumbre en la muestra } (\sigma_m) : 752 / 20499 (100) = 3.66 \%$$

- Grado de incertidumbre total: A este error se debe sumar el grado de incertidumbre del fondo esto nos da el grado de incertidumbre total en la determinación.

$$\sigma_m + \sigma_f = 3.66\% + 1.87\% = 5.53 \%$$

Este error puede disminuirse a voluntad aumentando el tiempo de detección en la muestra.

Como podemos observar la incertidumbre en la determinación de las 25 muestras son menor a 10 % en todos los casos siendo el valor más alto en la miel de abeja marca “Carlota” (8.41%) y menor en la muestra de grano de café (5.52%) , por lo que la diferencia entre estos valores es de 2.89 % . El error estadístico como recordaremos lo podemos disminuir a voluntad aumentando el tiempo de detección de la muestra.

- Finalmente el % de potasio y la actividad total del  $^{40}\text{K}$

Como explicamos anteriormente el proceso para los cálculos es el sig.

Por ejemplo en el caso de la muestra de **Clara de Huevo:**

El peso de la muestra de clara de huevo es:  $W_M = 471.7\text{ g}$

El resultado de la determinación en el equipo es de  $20499 \pm 752\text{ cp } 70915\text{ s}$

$C_m = 20499 \pm 752$  cp 70915 s por lo que :  $20499 / 70915 = 0.289$  cps ; para las cuentas, y de igual forma para la incertidumbre en la determinación ;

$$\pm 752 / 70915 = \pm 0.0106 \text{ cps};$$

es decir:  $0.289 \pm 0.0106$  cps

a este resultado se le resta la radiación de fondo, que como recordaremos es :

$$C_f = 0.233 \pm 0.007 \text{ cps}$$

para obtener solo las cuentas obtenidas por la muestra :

$$C = 0.056 \pm 0.0176 \text{ cps}$$

Sustituyendo en la fórmula anterior :

$$\% K = \frac{(0.289 - 0.233) \times 1304.16}{471.7 \text{ g}} = \mathbf{0.154 \% \text{ de Potasio en clara de huevo .}}$$

Debemos recordar que la constante de 1304.16 es una constante calculada para este estudio en particular ya que la eficiencia en la detección es para nuestro estudio y equipo en particular. El grado de incertidumbre total esperado en la determinación debe ser menor a 10 %; esto se debe a que como ya hemos mencionado el decaimiento de un núcleo radiactivo es un proceso al azar, por lo que no se sabe en que momento un núcleo decaerá emitiendo radiactividad por lo que analizando el radionúclido durante el mayor tiempo posible, podemos tener la certeza de que estamos detectando un promedio mejor establecido de los rayos X emitidos por unidad de tiempo.

Para calcular la actividad total del potasio 40 y como recordamos:

$$A_e = \frac{(C_m - C_f)}{E \times \text{Dec. } \gamma \times W_M}$$

$$A_e = \frac{(C_m - C_f) [\text{cps}]}{0.022 [\text{ctas. / rad. } \gamma] \times 0.11 [\text{rad } \gamma / \text{des}] \times W_M [\text{g}]} = \text{dps / g} = \text{Bq / g de alimento}$$

$$A_e = \frac{(0.056) [\text{cps}]}{0.022 \times 0.11 \times 471.7 \text{ g}} = 0.04905 \text{ Bq / g de alimento}$$

Lo expresaremos por Kg de alimento ya que la legislación así lo solicita :

$$A_e = 0.04905 \text{ Bq / g de alimento ( 1000 g / 1 Kg )} = \mathbf{49.05 \text{ Bq/Kg de clara de huevo .}}$$

Hay que recordar que solo el 0.0118 del potasio total en el alimento corresponde al potasio 40 radiactivo ( abundancia isotópica) y tiene una actividad de 31.685 Bg/ g de potasio .

Por lo anterior también podemos calcular el potasio total en la muestra de la siguiente forma:

$$\% K = 0.04905 / 31.685 \times 100 = 0.154 \%$$

Se reporta la actividad total por Kg de alimento analizado de acuerdo a la legislación nacional y como resultado vemos que entre mayor es el contenido de potasio en la muestra mayor es la radiactividad del alimento.(23)

**TABLA 8: DATOS Y RESULTADOS**

<b>MUESTRA ( ALIMENTO )</b>	<b>PESO MUESTRA</b>	<b>TIEMPO DE PRUEBA</b>	<b>RESULTADO ( Cuentas detectadas por)</b>	<b>TIEMPO VIVO</b>	<b>cps</b>	<b>cps - Fondo</b>
Clara de huevo	471.7 g	79 200 s	20499 ± 752 cp	70915 s	0.289 cps ± 0.0106	0.056 cps ± 0.0046
Yema de Huevo	471.4 g	79 200 s	21344 ± 764 cp	76316 s	0.280 cps ± 0.0107	0.047 cps ± 0.0047
Fècula de maíz	276.1 g	79 200 s	17269 ± 717 cp	72909 s	0.234 cps ± 0.0090	0.001 cps ± 0.003
Harina de maíz nixtamalizada	254.8 g	79 200 s	21660 ± 722 cp	71222 s	0.304 cps ± 0.0101	0.071 cps ± 0.0041
Harina de trigo refinada	300 .0 g	79 200 s	18270 ± 738 cp	70948 s	0.257 cps ± 0.0104	0.024 cps ± 0.0044
Harina de trigo Integral	303.5 g	79 200 s	26890 ± 705 cp	71091 s	0.378 cps ± 0.0010	0.145 cps ± 0.005
Crema	423.9 g	79 200 s	17712 ± 745 cp	69108 s	0.256 cps ± 0.0107	0.023 cps ± 0.0047
Leche descremada	455.0 g	79 200 s	19792 ± 749 cp	69359 s	0.285 cps ± 0.0108	0.052 cps ± 0.0048
Arroz Integral	365.9 g	79 200 s	22732 ± 722 cp	70211 s	0.323 cps ± 0.0103	0.090 cps ± 0.0043
Arroz Pulido de grano largo	383.8 g	79 200 s	17403 ± 729 cp	70082 s	0.248 cps ± 0.0104	0.015 cps ± 0.0044
Harina de Arroz	396.9 g	79 200 s	17310± 735 cp	70416 s	0.245 cps ± 0.0104	0.012 cps ± 0.0044
Arroz Salvaje	387.5 g	79 200 s	23674 ± 736 cp	72192 s	0.328 cps ± 0.0102	0.095 cps ± 0.0042
Plátano dominico	462.4 g	79 200 s	22350 ± 640 cp	52100 s	0.429 cps ± 0.0122	0.196 cps ± 0.0062
Jitomate	440.1 g	79 200 s	24946+ 743 cp	72297 s	0.345 cps ± 0.0102	0.112 cps ± 0.0042
Papaya Maradol	418.3 g	79 200 s	18785 ± 696 cp	64737 s	0.291 cps ± 0.0107	0.058 cps ± 0.0047
Miel de Abeja Marca Carlota	604.4 g	79 200 s	12155 ± 623 cp	49848 s	0.244 cps ± 0.0125	0.011 cps ± 0.0065
Miel de Abeja	594.1 g	79 200 s	20749± 743 cp	71557 s	0.290 cps ± 0.0104	0.057 cps ± 0.0044
Nuez de Castilla	223.4 g	79 200 s	23348 ± 739 cp	74022 s	0.315 cps ± 0.009	0.082 cps ± 0.003
Amaranto	48.6 g	79 200 s	16264 ± 716 cp	68171 s	0.238 cps ± 0.0105	0.005 cps ± 0.0045
Jugo de naranja	411.3 g	79 200 s	19829 ± 746 cp	71352 s	0.278 cps ± 0.0104	0.045 cps ± 0.0044
Naranja entera	460.5 g	79 200 s	19526+ 734 cp	65703 s	0.297 cps ± 0.0111	0.064 cps ± 0.0051
Grano de café	173.7 g	79 200 s	32606 ± 730 cp	65852 s	0.495 cps ± 0.0110	0.262 cps ± 0.005
Café infusion	418.5 g	79 200 s	17317 ± 714 cp	64994 s	0.266 cps ± 0.0109	0.033 cps ± 0.0049
Manzanilla ( C. Matricaria)	120 g	79 200 s	23281 ± 768 cp	78572 s	0.296 cps ± 0.0097	0.063 cps ± 0.0037
Infusión de Manzanilla	498.9 g	79 200 s	17924 ± 759 cp	75725 s	0.237 cps ± 0.0100	0.004 cps ± 0.004

**TABLA 9 : DATOS Y RESULTADOS**

<b>MUESTRA ( ALIMENTO )</b>	<b>TIEMPO MUERTO</b>	<b>GRADO DE INCERT. MTA</b>	<b>GRADO DE INCERT. TOTAL</b>	<b>% DE POTASIO ENCONTRADO (ESPECTROMETRIA GAMMA)</b>	<b>ACTIVIDAD TOTAL DEL <sup>40</sup>K</b>
Clara de huevo	8285 s	3.66%	5.53%	0.154%	49.05 Bq/Kg
Yema de Huevo	2884 s	3.58%	5.45%	0.130 %	41.19 Bq/Kg
Fècula de maíz	6291 s	4.15%	6.02%	0.017%	1.5 Bq/Kg
Harina de maíz nixtamalizada	7978 s	3.33%	5.20%	0.363 %	115.54 Bq/Kg
Harina de trigo refinada	8252 s	4.04%	5.91%	0.106 %	33.06 Bq/Kg
Harina de trigo Integral	8109 s	2.62%	4.49%	0.622 %	197.42 Bq/Kg
Crema	10092 s	4.20%	6.07%	0.0706%	22.42 Bq/Kg
Leche descremada	9841 s	3.78%	5.65%	0.150 %	47.22 Bq/Kg
Arroz Integral	8989 s	3.17%	5.04%	0.323 %	101.64 Bq/Kg
Arroz Pulido de grano largo	9118 s	4.19%	6.06%	0.052 %	16.15 Bq/Kg
Harina de Arroz	8784 s	4.25%	6.12%	0.042 %	12.50 Bq/Kg
Arroz Salvaje	7008 s	3.11%	4.98%	0.319 %	101.30 Bq/Kg
Plátano dominico	27100 s	2.86%	4.73%	0.551 %	175.15 Bq/Kg
Jitomate	6903 s	2.98%	4.85%	0.3313%	105.16 Bq/Kg
Papaya Maradol	14463 s	3.70%	5.57%	0.29%	57.29 Bq/Kg
Miel de Abeja Marca Carlota	29352 s	5.12%	6.99%	0.023%	7.52 Bq/Kg
Miel de Abeja	7643 s	3.58%	5.45%	0.125 %	39.64 Bq/Kg
Nuez de Castilla	5178 s	3.16%	5.03%	0.480%	151.67 Bq/Kg
Amaranto	11029 s	4.40%	6.27%	0.149%	42.51 Bq/Kg
Jugo de naranja	7848 s	3.76%	5.63%	0.142%	45.21 Bq/Kg
Naranja entera	13497 s	3.75%	5.62%	0.181%	57.42 Bq/Kg
Grano de café	13348 s	2.23%	4.10%	1.96%	623.28 Bq/Kg
Café infusión	14205 s	4.12%	5.99%	0.104 %	32.58 Bq/Kg
Manzanilla ( C. Matricaria)	628 s	3.30%	5.17%	0.686	216.94 Bq/Kg
Infusión de Manzanilla	3475 s	4.23%	6.10%	0.00935	3.31 Bq/Kg

La actividad de <sup>40</sup>K se reporta en Bq/Kg = dps/Kg de alimento de acuerdo a la NOM-088-SSA-1994 y FDA

#### **4.10 Comparación de resultados obtenidos por espectrometría gamma y los resultados reportados por el “INSTITUTO NACIONAL DE NUTRICIÓN SALVADOR ZUBIRÁN” para los mismos alimentos :**

La comparación de estos resultados se encuentran en la tabla 10 en la sig. página.

Primeramente el método que utilizan para cuantificación de potasio en el INNSZ es el método de Espectrometría de Absorción Atómica que es el método Oficial del AOAC con algunas modificaciones en el método hechas por ellos mismos y en el que la muestra se somete a una digestión húmeda con ácido Nítrico y se cuantifica por espectrometría de absorción atómica.

Las ventajas de este método sobre la espectrometría gamma:

- Es un método ampliamente usado específicamente para determinación de potasio en muestras de alimentos y en el que el INNSZ tiene amplia experiencia en la aplicación y manejo de muestras e instrumento.
- Es un método ya validado.
- El tamaño de la muestra no es tan grande como en nuestro estudio ya que se usan solo algunos gramos.

Desventajas:

- El método requiere un mayor manejo de muestra ya que se requiere hacer una digestión húmeda.

En la tabla 10 de comparación podemos ver:

En la primera columna se describe la muestra ó alimento que se compara.

En la segunda columna se reporta el % de potasio total encontrado para cada alimento por el método propuesto (espectrometría gamma con un detector de NaI con impurezas de Talio).

En la tercera columna se reporta el % de potasio encontrado en las “Tablas de valor nutritivo de los alimentos de mayor consumo en Latinoamérica” publicadas por el INNSZ. (28)

En algunos alimentos comparando ambos resultados se encuentra que son aproximados como en la leche descremada, papaya, nuez de castilla y naranja entera .

En otros alimentos no hay datos reportados por el INNSZ para el potasio, estos casos son: fécula de maíz, harina de maíz nixtamalizada, harina de trigo integral, “arroz salvaje”, amaranto, café en grano y en infusión, manzanilla en hierba y en té, en el INNSZ verbalmente me comentaron que en algunos casos hasta el momento no se han realizado los análisis en todos los alimentos reportados para algunos minerales y en los casos mencionados no se ha determinado el contenido de potasio.

Sin embargo para concluir definitivamente sobre estos resultados necesitaríamos hacer un estudio más profundo ya que hay que recordar que el presente solo se llevó a cabo con una sola muestra sin embargo consideramos una gran ventaja que la manipulación de la muestra sea mínima.

**TABLA 10 :COMPARACION DE DATOS OBTENIDOS VS. DATOS REPORTADOS POR EL INNSZ**

<b>MUESTRA ( ALIMENTO )</b>	<b>% DE POTASIO ENCONTRADO (ESPECTROMETRIA GAMMA)</b>	<b>% DE POTASIO REPORTADO (TABLAS INNSZ)</b>
Clara de huevo	0.154%	0.137%
Yema de Huevo	0.130 %	0.09%
Fècula de maíz	0.017%	----- *
Harina de maíz nixtamalizada	0.363 %	----- *
Harina de trigo refinada	0.106 %	0.095%
Harina de trigo Integral	0.622 %	----- *
Crema	0.0706%	0.122%
Leche descremada	0.150 %	0.154%
Arroz Integral	0.323 %	0.214 %
Arroz Pulido de grano largo	0.052 %	0.214 %
Harina de Arroz	0.042 %	0.214 %
Arroz Salvaje	0.319 %	----- *
Plátano dominico	0.551 %	0.370%
Jitomate	0.3313%	0.207%
Papaya Maradol	0.29%	0.257 %
Miel de Abeja Marca Carlota	0.023%	0.051%
Miel de Abeja granel	0.125 %	0.051%
Nuez de Castilla	0.480%	0.450%
Amaranto	0.149%	----- *
Jugo de naranja	0.142%	0.200 %
Naranja entera	0.181%	0.181%
Grano de café	1.96%	----- *
Café infusion	0.104 %	----- *
Manzanilla ( C. Matricaria)	0.686	----- *
Infusión de Manzanilla	0.00935	----- *

\* no se han determinado estos alimentos por lo que no se reportan resultados

En resumen podemos decir que:

- ❖ En el presente estudio y como hemos visto, esperábamos encontrar potasio-40 ya que es un radioisótopo de ocurrencia natural presente en los alimentos, no así el Cesio-137, que indicaría contaminación radiactiva por fuentes artificiales.
- ❖ No se encontró  $^{137}\text{Cs}$  en ningún alimento analizado, por lo que no hay evidencia de contaminación radiactiva en los alimentos analizados.
- ❖ Los alimentos en los que se encontró mayor contenido de Potasio es el café, no lo consumimos en forma de grano, por lo que decidimos analizar que tanto del potasio contenido en el grano pasa a la infusión de café de consumo general.
- ❖ El mayor contenido de Potasio en los alimentos analizados es en el sig. Orden :

Café en grano	1 960	mg de Potasio /100 g de café en grano
Hierba de Manzanilla	686	mg de Potasio /100 g de hierba de manzanilla
Harina de trigo integral	622	mg de Potasio /100 g de trigo integral
Plátano dominico	551	mg de Potasio /100 g de plátano dominico
Nuez de Castilla	480	mg de Potasio /100 g de Nuez de Castilla
Harina de Maíz nixtamalizada	363	mg de Potasio /100 g de Harina de maíz nixtamalizada
Jitomate	331	mg de Potasio /100 g de jitomate
Arroz Integral	323	mg de Potasio /100 g de Arroz integral
Arroz salvaje	319	mg de Potasio /100 g de Arroz salvaje
Papaya Maradol	183	mg de Potasio /100 g de Papaya maradol
Naranja entera	181	mg de Potasio /100 g de Naranja entera
Yema de huevo	130	mg de Potasio /100 g de yema de huevo
Leche descremada	150	mg de Potasio /100 g de leche descremada
Amaranto	149	mg de Potasio /100 g de amaranto
Jugo de naranja	142	mg de Potasio /100 g de jugo de naranja
Clara de huevo	130	mg de Potasio /100 g de clara de huevo
Miel de abeja a granel	125	mg de Potasio /100 g de miel de abeja
Harina de trigo refinada	106	mg de Potasio /100 g de Harina de Trigo refinada
Infusión de café	104	mg de Potasio /100 g de infusión de café
Crema de leche	71	mg de Potasio /100 g de crema de leche
Arroz pulido de grano largo	52	mg de Potasio /100 g de arroz pulido de grano largo
Harina de arroz	42	mg de Potasio /100 g de Harina de arroz
Miel de abeja marca "Carlota"	23	mg de Potasio /100 g de miel de abeja
Fécula de maíz	17	mg de Potasio /100 g de Fécula de maíz
Infusión de Manzanilla	9	mg de Potasio /100 g de Infusión de Manzanilla

- ❖ A la luz de los resultados obtenidos y de acuerdo a las tablas 8 y 9 podemos ver que la radiactividad natural emitida por el  $^{40}\text{K}$  es directamente proporcional al contenido de potasio total en los alimentos.

- ❖ Como ya hemos comentado estamos expuestos a la radiación interna proveniente de los alimentos debido al radioisótopo potasio-40, radiación que no se puede evitar y a la que la humanidad siempre ha estado expuesta, tomemos en cuenta que estos resultados están expresados en Bq/Kg y para conocer mejor la emisión el dato se tendría que hacer el cálculo por ración en los alimentos que se consumen como se analizaron ( clara y yema de huevo, crema, leche descremada, plátano dominico, jitomate , papaya Maradol , Miel de abeja, nuez de castilla, amaranto, naranja y su jugo infusión de café y de manzanilla); los demás se tienen que analizar de la manera en la que se consumen es decir cocinados como el arroz , prepararse como se consume y analizarlo , por lo que nos daría un dato más confiable para conocer el contenido de potasio en su dieta y aportación de niveles radiactivos al organismo.
  
- ❖ En la tabla 10 se observa el contenido de potasio total obtenido por el método de espectrometría gamma y el contenido de potasio total reportado en las *Tablas de Valor nutritivo de los alimentos de mayor consumo en Latinoamérica* que publica el Instituto Nacional de la Nutrición Salvador Zubirán y cuyo método es por espectrometría de absorción atómica. En donde se encuentran diferencias en algunos alimentos, y otros no se han determinado. Las diferencias encontradas pueden deberse a diferencias en los métodos analíticos aunque esto por el momento se tendría que hacer un estudio más profundo tomando en cuenta que solo se hizo con una muestra el presente estudio. Se tendría que ver además el aporte de potasio total y la radiactividad del  $^{40}\text{K}$  por ración de alimento.
  
- ❖ De acuerdo a los resultados del estudio podemos decir que:
  - En el presente estudio se establecieron las bases analíticas referentes a determinación de fondo radiactivo, eficiencia en la detección y tiempo de detección de acuerdo al espectrómetro gamma utilizado para la detección de  $^{40}\text{K}$ .
  - El grado de incertidumbre total ( muestra + fondo ) es en todos los casos menor del 10 %, lo cual es adecuado y permitido por la legislación nacional e internacional para este tipo de métodos; este margen tan amplio se considera así ya que el decaimiento radiactivo es un proceso al azar, por lo que esta regido por las leyes de la estadística.

En cuanto a los alimentos analizados:

- La diferencia en el contenido de potasio entre la harina de trigo refinada y la integral es de 0.516 % que es el contenido que se encuentra en el salvado.
- En el arroz la cascarilla contiene 0.2707 % de potasio.
- En la miel de abeja a granel la diferencia en el contenido es de 0.1015 % sobre la miel “Carlota”, posiblemente porque a granel el filtrado no es tan eficiente y contiene polen.
- En la naranja entera se encontró que contiene 0.034 % más de potasio que en el jugo.
- Los valores más altos de potasio encontrados en el presente estudio son : Grano de café que contiene 1.96 % ; y
- Manzanilla que contiene 0.686 % de potasio ; lo cual quiere decir que también su radiactividad debida al radioisótopo natural  $^{40}\text{K}$  es mayor, debemos tomar en cuenta que ninguno de estos dos productos se consumen tal cual ya que

ambos se utilizan para hacer infusiones y la cantidad de potasio que pasa a la infusión es muy inferior al contenido inicial.

- ❖ El peso de las muestras es variable ya que la densidad del alimento determina el peso del mismo, que siempre equivaldrán a 500 mL aproximadamente de capacidad volumétrica del Marinelli, por ejemplo: el amaranto fue el de menor peso y la miel de abeja marca “Carlota” la de mayor peso (48.6 g y 604.4 g respectivamente). Por este motivo estas son consideradas macromuestras para el análisis.
- ❖ La radiación interna recibida en el organismo por los alimentos aún no se ha podido estimar su daño exacto, a pesar que desde el inicio de la humanidad hemos estado expuestos a estas pequeñas dosis de radiación y se ha considerado como un daño mínimo sin embargo existente. También debemos de considerar que estamos expuestos a la radiación proveniente de los edificios, y nuestro demás entorno.

Adicionalmente debo mencionar que:

- ❖ Este trabajo es preliminar y se usó una muestra para determinar la variabilidad del equipo, sin embargo es importante hacer un estudio más completo para saber que tan reproducible es, haciendo el análisis con 3 muestras.
- ❖ A pesar de que el potasio es uno de los elementos de mayor distribución en la naturaleza, es importante conocer la cantidad que aporta cada alimento así como la aportación de la dieta regular del mexicano en cada región del país, ya que es de vital importancia en el organismo.
- ❖ El potasio elemental contiene un 0.0118 % como potasio -40 radiactivo de cuya dosis no es posible escapar y que a través de la historia de la humanidad hemos recibido esta radiación natural.
- ❖ Los resultados obtenidos son todos en base húmeda en un reducido número de muestras y también en un reducido número de análisis (uno para cada muestra), en los cuáles hasta el momento se ha obtenido una completa congruencia entre las desviaciones y el error estadístico de cada determinación proporcionado por el programa Maestro de Detección Radiactiva.
- ❖ La validación del método utilizado requiere un mayor número de muestras de diferentes tipos de alimentos, su aplicación en muestras de referencia para su comparación con otros métodos.
- ❖ Maneja volúmenes macroscópicos de alimentos, como son cientos de mililitros ó de gramos, lo que elimina el problema de la homogeneidad en muestras pequeñas de fracciones de gramos ó mililitros.
- ❖ No se requiere la disolución ó digestión de la muestra ni otra manipulación a fin de preparar la muestra para su análisis químico ó instrumental.
- ❖ Su grado de error estadístico, desviación ó incertidumbre, si bien no es posible eliminar si puede reducirse a voluntad por el aumento del tiempo de detección.

- ❖ Se trata de un método instrumental en el cuál la intervención del analista se reduce al mínimo:  
pesar la muestra en el Marinelli, colocarlo en el detector y programar el sistema por un tiempo determinado que puede transcurrir igual de día que de noche.
- ❖ Adicionalmente, se puede verificar la ausencia de contaminación radiactiva en alimentos, que ya ocurrió por  $^{137}\text{Cs}$  principalmente, debido al accidente de Chernobyl, a partir del cuál se ha legislado esta prueba como obligatoria en varios países incluido México, tanto para la importación como la exportación de productos alimenticios.
- ❖ Por último se trata de un método que por su sencillez y versatilidad hace posible la utilización del  $^{40}\text{K}$  como un trazador radiactivo natural en la investigación de alimentos , por ejemplo la proporción de potasio que pasa de sólidos a infusiones ( café ó té ) , o bien la metabolización de potasio en granos con corteza (café, arroz ) ó cualesquiera otra posible que pudiera ser de interés en el futuro.
- ❖ Si consideramos que la mayoría de los alimentos contienen potasio, estamos ingiriendo de potasio radiactivo y esto no puede evitarse, de la misma manera que no podemos evitar el recibir radiactividad de la tierra, la atmósfera, de los edificios en que vivimos y de los cuerpos de los seres vivos, así como al inhalar radón por lo que es importante no aumentar las dosis de exposición provengan de emisores externos ó internos.
- ❖ Es importante resaltar que aunque la radiación proveniente de los alimentos es un factor al que la humanidad siempre ha estado expuesta poseen una energía de ionización específica baja y es considerado un daño mínimo, sin embargo existente.

## 5: CONCLUSIONES.

- Mediante el método de espectrometría gamma usando un analizador multicanal con un detector de centelleo de Ioduro de Sodio (NaI) con impurezas de Talio, es posible en el mismo análisis determinar contaminación por fuentes radiactivas artificiales mediante la presencia de  $^{137}\text{Cs}$  que se detecta a 662 KeV, así como es posible conocer la cantidad de potasio-40 radiactivo que se detecta a 1461 KeV presente en los alimentos (u otros materiales) y calcular la cantidad de potasio total presente.
- En ningún alimento se encontró evidencia de contaminación radiactiva (presencia de  $^{137}\text{Cs}$ ).
- El método utilizado requiere de la mínima preparación de las muestras, lo que es una ventaja analítica y se puede usar concomitantemente al monitorear índice de contaminación radiactiva.
- El grado de incertidumbre total con respecto al equipo es menor al 10 % en todos los casos lo cuál es permitido de acuerdo a la reglamentación mexicana e internacional.
- En este trabajo se pudo conocer la radiación natural de algunos alimentos muy consumidos y se pudo verificar la ausencia de contaminación radiactiva proveniente de fuentes artificiales.
- Los resultados presentados en este trabajo pueden considerarse como valores preliminares que servirán de apoyo para la validación del método utilizado.
- La validación del método propuesto requiere de un mayor numero de muestras de diferentes tipos de alimentos; su aplicación en muestras de referencia para su comparación con otros métodos.

## ANEXO I:

### FOTOGRAFIAS DEL EQUIPO USADO EN EL ESTUDIO:



Figura : 8 Espectrofotómetro gamma con detector de centelleo de NaI(Tl) acoplado a una PC



Figura 9: Pozo de detección



Figura 10: En la parte inferior del detector se observa el tubo fotomultiplicador



Figura 11: Marinelli con muestra en el pozo de detección.



Figura 12: Marinelli con muestra

ANEXO II: Certificado del Multinúclido usado en la calibración .

## CERTIFICATE OF CALIBRATION MULTINUCLIDE STANDARD SOURCE

Customer:	MEDIDORES INDUSTRIALES Y MEDICOS S.A.	P.O. No.:	E-3827	
Catalog No.:	EG-ML	Reference Date:	15-Nov-00	12 00 PST
Source No.:	733-99	Total Radioactivity:	5.215	μCi
		Total Radioactivity:	193.0	kBq

**Description of Source**

a. Capsule type:	500 mL Marinelli beaker (533N)
b. Nature of active deposit:	Multinuclide distributed in 1.0 g/cc epoxy matrix
c. Active diameter/volume:	Approximately 500 mL (499.9 grams)
d. Backing:	Plastic
e. Cover:	Plastic

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity (μCi)	Gammas per second	Total Uncert.
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	1.629	2188	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.05626	1782	3.1%
159	Te-123m	119.7 ± 0.1 days	84.0	0.08354	2596	3.0%
320	Cr-51	27.706 ± 0.007 days	9.86	1.782	6501	3.0%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.89	0.2787	6691	3.0%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	0.3539	12880	3.0%
662	- Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	0.2536	7985	3.0%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	0.4848	16860	3.0%
1173	-Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	0.2933	10840	3.0%
1333	-Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	0.2933	10850	3.0%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.36	0.4848	17820	3.0%

**Method of Calibration**

This source was prepared from a weighed aliquot of solution whose concentrations in μCi/g were determined by gamma spectrometry.

**NIST Traceability**

This calibration is traceable to the National Institute of Standards and Technology.

**Leak Test(s)**

See reverse side for Leak Test(s) applied to this source.

**Notes**

- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- IPL participates in an NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (As in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Overall uncertainty is calculated at the 99% confidence level.
- This source has a working life of 1 year.



ISOTOPE PRODUCTS LABORATORIES

1800 N. KEYSTONE ST.  
BURBANK, CALIFORNIA 91504

818•843•7000 FAX 818•843•6168

ISO 9001 CERTIFIED

*Daniel James Van Dalsom*  
Quality Control

28-NOV-00

Date Signed

IPL Ref No. 733-99

## **6 : BIBLIOGRAFIA:**

- (1)** Campbell, R .Las radiaciones reto y Realidades . Fondo de Cultura Económica. 2 edición . La educación para todos .( ISBN 968-16-5268-1) .México .1997 p.p. 7 - 67
- (2)** Bulbilian, S . La radiactividad .Fondo de Cultura Económica. .( ISBN 968-16-2651-6) México. 1987 p.p. 3-61
- (3)** Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (*ATSDR*). 1999. Reseña Toxicológica de la Radiación Ionizante . Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicios de Salud Pública.
- (4)** Campbell, R. Cameras R .Las radiaciones II .El manejo de las radiaciones nucleares . Fondo de Cultura Económica. .Primera edición ( ISBN 968-16-3545-0) México 1995 p.p. 3-16 ; 48-53
- (5)** Instituto Nacional de Investigaciones nucleares. Radiactividad y Energia nuclear . 2003 [www.inin.mx](http://www.inin.mx) . consultada en Enero 2005
- (6)** Rodnyi P.A. Progress in fast scintillators . Radio measurements 2003 vol. 33 . p.p. 605-614
- (7)** Navarrete ,M. Cabrera L. Introducción al estudio de los radioisótopos. 2ª ed. UNAM. México 1993 p.p. 13-75
- (8)** Comisión de Energía Nuclear Argentina . Conociendo la Energía nuclear . [http : //caebis.cnea.gov.ar](http://caebis.cnea.gov.ar) . [na-sa.com.ar](http://na-sa.com.ar) Pag. Consultada en Junio de 2005
- (9)** Acon, Iria . Radiactividad. Costa Rica OIEI . 2001 [www.oei.org.co/fpciencia/art19.html](http://www.oei.org.co/fpciencia/art19.html) responsable de la página : Organización de Estados Iberoamericanos Pag. Consultada en Junio de 2005
- (10)** Comision Ecuatoriana de Energía Atómica . Entorno Nuclear. 1999 [www.ecunucloear.gov.ec](http://www.ecunucloear.gov.ec) Pag. Consultada en Junio de 2005
- (11)** John De Armond . Sci.energy,sci.environment: Nat. Gas and Nuclear Accidents Performance engineering magazine .1993. US. [http : //yarchive.net/nuke/potassium-40 .html](http://yarchive.net/nuke/potassium-40.html) Pag. Consultada en Junio de 2005
- (12)** Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, División de Toxicología, ( ATSDR )WWW es <http://www.atsdr.gov> Fecha de consulta : Mayo 2005
- (13)** Murray D. Biology of food Irradiation . Research Studies Press. 1990. USA .ISBN04719262130863800963
- (14)** D.L. Anderson D.L., Cunningham W.C., Capar S.G., Baratta E.J. ,Mackill P. Nuclear methods for food analysis at the U.S. Food and Drug Administration. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry . 2001. Vol. 249, No. 1 p.p. 29-32

- (15) Accidental Radioactive Contamination of human food and animal feeds . 1998. FDA. USA. [www.fda.gov.cdrh](http://www.fda.gov.cdrh) U.S. Department of Health and human Services. Documento aprobado el 13 de agosto de 1998 . Fecha de consulta : Mayo 2005
- (16) <http://www.environmental-studies.de/Radioecology/Radiocesium/radiocesium.html>  
Fecha de Consulta: Feb. 2005
- (17) LIBERONA J.L. Programa Disciplinario de Fisiología y Biofísica ICBM, Facultad de Medicina Universidad de Chile [jliberon@med.uchile.cl](mailto:jliberon@med.uchile.cl) . Biotica 1:9-11 . Consultado Ene. 2005.
- (18) H.Kawamura , R.M. Parr , Nuclear Methods for the analysis of Foods and Nutrients . Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry . 2001 .Vol. 249, No. 1 p.p. 5-10
- (19) Faanhof A. , Louw I. The measurement of Natural radioactivity in Fish and the impact in humans . Journal. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry . 2001 .Vol. 249, No. 1 p.p. 227-232
- (20) Atta S., Sattar A., Ahmad A., Ali I., Nagra S. A. y Ahmad, T. Suitability of thermoluminescence for the detection of irradiated chicken and fish. J. Radioanal. Nucl. Chem. 2001 . 250(3) p.p. 537-540.
- (21) Dvoák P., Kratochvíl B. y Grolichová M. Changes of colour and pH in fish musculature after ionizing radiation exposure. Eur. Food Res. Technol. 2004 . 217(4) p.p.1036-9.
- (22) Irradiation in the production , processing and Handling of Food. [CFR: Dic. 23, 2004 (Volume 69, Number 246)][Page 76844-76847] Federal Register 21 CFR Part 179
- (23) NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-088-SSA1-1994, Bienes y Servicios. Contaminación por radionuclidos en alimentos de consumo masivo importados. Limites máximos permisibles. Consultado en Oct. 2004
- (24) NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-033-SSA1-1993, Bienes y Servicios. Irradiación de alimentos . Dosis permitidas en alimentos , materias primas y aditivos alimentarios . . Consultado en Oct. 2004
- (25) Tablas de valor nutritivo de los alimentos de mayor consumo en Latinoamérica publicado por el Instituto Nacional de Nutrición "Salvador Zubirán"  
Muñoz, Miriam ; Mendoza , Eduardo . Instituto Nacional de Nutrición . Ed. Pax . México . 1996 p.p.1- 324
- (26) Manual MERCK, 10ªed. Sec.2 enfermedades endocrinas y metabólica .Cap.12 metabolismo del agua, los electrólitos, los minerales y el equilibrio acidobásico.
- (27) [www.csi.uottawa.ca.4321/astronomy/scattering.html](http://www.csi.uottawa.ca.4321/astronomy/scattering.html) Responsable de la página : Astronomy Sciences Canadá . Consultado el 20 de Dic. de 2004
- (28) Navarrete J.M. Campos. Martinez T. Cabrera L. Determination of potassium traces in foodstuffs by natural <sup>40</sup>K radiation . J. of Radioanalytical and Nucl. Chem. 2005 Vol. 265 p.p. 133–135

**(29)** Ruiz Gomez R.J. Instituto de Investigaciones Biológicas . Detección de Rayos Gamma con detector de centelleo de NaI(Tl). España. 1997

**(30)**

[www.gemedicalsystemseurope.com/eues/rad/nm\\_pet/products/pe...gia/princ/bases/detec.htm](http://www.gemedicalsystemseurope.com/eues/rad/nm_pet/products/pe...gia/princ/bases/detec.htm)  
Responsable de la pág. Asoc. de Medicina Nuclear de la Comunidad Europea. Consultado el 28 de Feb. de 2005

**(31)** C.W.E. van Eijka; ., P. Dorenbosa, E.V.D. van Loef, K. Kramer, H.U. Gudel  
Energy resolution of some new inorganic-scintillator gamma-ray detectors .Radiation Measurements 2001 Vol. 33 p.p. 521–525

**(32)** Ilic R. , Skvar J., Golovchenko A.N. Nuclear tracks: present and future perspectives .  
Radiation Measurements 2003 Vol 36 p.p. 83 – 88

**(33)** Lavi N. Alfassi Z.B. Development of Marinelli beaker standards containing thorium oxide and application of measurements of radioactive environmental samples Radiation Measurements. 2005 Vol. 39 p.p.15-19.

**(34)** Navarrete T.J. A practical determination method of potassium traces in foodstuffs by the use of the natural  $^{40}\text{K}$  radiation . INCS News , 2<sup>nd</sup> Issue . Vol. 1 No. 2

Consulta general :

**(35)** NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-012-NUCL-2002, Requerimientos y calibración de monitores de radiación ionizante. Consultado en Oct. 2004

**(36)** NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-008-NUCL-2003, Control de la contaminación radiactiva.  
Consultado en Oct. 2004

**(37)** NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-012-STPS-1999, Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, usen, manejen, almacenen o transporten fuentes de radiaciones ionizantes. Consultado en Oct. 2004

**(38)** NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-031-NUCL-1999, Requerimientos Para La Calificación y Entrenamiento Del Personal Ocupacionalmente Expuesto a Radiaciones Ionizantes . Consultado en Oct. 2004 .