

201  
201



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LA RADIACTIVIDAD NATURAL Y LA CONTAMINACION RADIACTIVA EN ALIMENTOS"

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
QUIMICO DE ALIMENTOS  
P R E S E N T A :  
MICHELE RIVEROLL SORIA



MEXICO, D. F.,



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

1998

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

266109-



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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. Navarrete Tejero J. Manuel

VOCAL: Prof. Valle Vega Pedro

SECRETARIO: Prof. Iturbe Chinas Francisca

1<sup>er</sup> SUPLENTE: Prof. Hidalgo Torres Miguel Angel

2<sup>o</sup> SUPLENTE: Prof. Ríos Campanella Rene Julio de los

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

- Facultad de Química, UNAM. Edificio D, Departamento de Química Inorgánica y Nuclear, Laboratorio 205. Ciudad Universitaria.
- Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (C.N.S.N.S.). Dr. Barragán # 779, Col. Narvarte, c.p. 0320.



Dr. Navarrete Tejero J. Manuel

ASESOR DEL TEMA



Riveroll Soria Michele

SUSTENTANTE

# ÍNDICE

|   | Página |
|---|--------|
| INTRODUCCIÓN .....  | 6      |
| 1 LA RADIOACTIVIDAD Y EL DECAIMIENTO RADIOACTIVO .....                                    | 8      |
| 1.1 EL DECAIMIENTO RADIOACTIVO .....  | 8      |
| 1.1.1 LEY DEL DECAIMIENTO RADIOACTIVO   |        |
| 1.1.2 TIEMPO DE VIDA MEDIA FÍSICA   |        |
| 1.2 TIPOS DE DECAIMIENTO RADIOACTIVO .....  | 11     |
| 1.2.1 PARTÍCULAS $\alpha$   |        |
| 1.2.2 PARTÍCULAS $\beta$  |        |
| 1.2.3 RAYOS $\gamma$  |        |
| 1.3 INTERACCIONES DE LA RADIOACTIVIDAD CON LA MATERIA .....                               | 14     |
| 1.3.1 INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS  |        |
| 1.3.2 INTERACCIÓN DE RADIACIONES SIN CARGA  |        |
| 1.4 ORIGEN DE LA RADIACIÓN .....  | 18     |
| 1.4.1 FUENTES RADIOACTIVAS NATURALES  |        |
| 1.4.2 FUENTES RADIOACTIVAS ARTIFICIALES   |        |
| 2 SEGURIDAD RADIOLÓGICA .....   | 22     |
| 2.1 UNIDADES EN QUE SE EXPRESA O MIDE LA RADIOACTIVIDAD ....                              | 22     |
| 2.1.1 UNIDADES DE ACTIVIDAD   |        |
| 2.1.2 UNIDADES DE DOSIS DE EXPOSICIÓN   |        |
| 2.1.3 UNIDADES DE DOSIS ABSORBIDA   |        |
| 2.1.4 UNIDADES DE DOSIS EQUIVALENTE   |        |
| 2.1.5 UNIDADES DE DOSIS EFECTIVA  |        |
| 2.2 EFECTOS BIOLÓGICOS DE LA RADIACIÓN (RADIOTOXICIDAD)....                               | 27     |
| 2.2.1 EFECTOS NO ESTOCÁSTICOS   |        |
| 2.2.2 EFECTOS ESTOCÁSTICOS  |        |
| 2.3 EFECTOS TÓXICOS ESPECÍFICOS, RELACIONADOS CON<br>BAJOS NIVELES DE RADIONÚCLIDOS ..... | 30     |
| 2.3.1 EFECTOS REPRODUCTIVOS   |        |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.3.2 | EFFECTOS TERATOGENICOS   |    |
| 2.3.3 | ACORTAMIENTO DE LA VIDA  |    |
| 2.3.4 | EFFECTOS GENÉTICOS   |    |
| 2.3.5 | EFFECTOS CARCINOGENICOS  |    |
| 3     | LA RADIOACTIVIDAD EN LOS ALIMENTOS .....   | 35 |
| 3.1   | IMPORTANCIA TOXICOLÓGICA DE LOS RADIONÚCLIDOS<br>EN LOS ALIMENTOS .....              | 36 |
| 3.1.1 | CANTIDADES ADMINISTRADAS   |    |
| 3.1.2 | MODO DE INTRODUCCIÓN   |    |
| 3.1.3 | DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS RADIONÚCLIDOS EN EL CUERPO                              |    |
| 3.1.4 | INTERVALO O GRADO DE RETENCIÓN EN EL CUERPO  |    |
| 3.1.5 | CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN O PARTÍCULA EMITIDOS<br>POR EL RADIONÚCLIDO INGERIDO |    |
| 3.1.6 | CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL RADIOACTIVO INGERIDO                                    |    |
| 3.2   | EMISORES INTERNOS Y SUS FUENTES .....  | 43 |
| 3.2.1 | EMISORES INTERNOS DE OCURRENCIA NATURAL  |    |
| 3.2.2 | EMISORES INTERNOS GENERADOS POR PRECIPITACIÓN RADIOACTIVA                            |    |
| 3.2.3 | RADIONÚCLIDOS LIBERADOS DE REACTORES NUCLEARES                                       |    |
| 4     | INSTRUMENTACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE LA RADIOACTIVIDAD ...                           | 52 |
| 4.1   | DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN .....                                 | 52 |
| 4.1.1 | LA EFICIENCIA  |    |
| 4.1.2 | ENERGÍA DE RESOLUCIÓN  |    |
| 4.1.3 | TIEMPO MUERTO DEL DETECTOR   |    |
| 4.2   | DETECTORES EN ESTADO GASEOSO .....   | 54 |
| 4.2.1 | CÁMARAS DE IONIZACIÓN  |    |
| 4.2.2 | DETECTORES PROPORCIONALES  |    |
| 4.2.3 | CONTADORES GEIGER-MULLER   |    |
| 4.3   | DETECTORES DE CENTELLEO .....  | 58 |
| 4.3.1 | FÓSFOROS INORGÁNICOS   |    |
| 4.3.2 | FÓSFOROS ORGÁNICOS   |    |
| 4.3.3 | EL TUBO FOTOMULTIPLICADOR  |    |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.4     | DETECTORES SEMICONDUCTORES EN ESTADO SÓLIDO .....  | 61  |
| 4.5     | OTROS COMPONENTES DE SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE DETECCIÓN  | 63  |
| 4.5.1   | ABASTECEDOR DE VOLTAJE   |     |
| 4.5.2   | PREAMPLIFICADOR  |     |
| 4.5.3   | AMPLIFICADOR   |     |
| 4.5.4   | DISCRIMINADOR  |     |
| 4.6     | PREPARACIÓN DE MUESTRAS RADIATIVAS .....   | 66  |
| 4.7     | INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....   | 68  |
| 5       | DESARROLLO EXPERIMENTAL .....  | 70  |
| 5.1     | DETECCIÓN DE LAS RADIACIONES EMITIDAS POR EL <sup>40</sup> K PRESENTE<br>EN KCl Y CÁLCULO DE SU TIEMPO DE VIDA MEDIA ..... | 70  |
| 5.1.1   | CALIBRACIÓN DEL SISTEMA ANALIZADOR MONOCANAL<br>CON DETECTOR DE NaI  |     |
| 5.1.1.1 | CALIBRACIÓN EN ENERGÍA   |     |
| 5.1.1.2 | CALIBRACIÓN EN EFICIENCIA  |     |
| 5.1.2   | DETECCIÓN DE LA RADIATIVIDAD DEL <sup>40</sup> K Y CÁLCULO<br>DE SU VIDA MEDIA   |     |
| 5.2     | DETERMINACIÓN DE <sup>137</sup> Cs Y <sup>40</sup> K EN MUESTRAS DE ALIMENTOS...   | 83  |
| 5.2.1   | CALIBRACIÓN DEL SISTEMA ANALIZADOR MULTICANAL<br>CON DETECTOR DE Ge(HP)  |     |
| 5.2.1.1 | CALIBRACIÓN EN ENERGÍA   |     |
| 5.2.1.1 | CALIBRACIÓN EN EFICIENCIA  |     |
| 5.2.2   | ANÁLISIS DE MUESTRAS DE ALIMENTOS  |     |
| 5.2.2.1 | ANÁLISIS DE LECHE EN POLVO   |     |
| 5.2.2.2 | ANÁLISIS DE CARNE DE RES MOLIDA  |     |
| 5.2.3   | DISCUSIÓN SOBRE LOS INSTRUMENTOS EMPLEADOS ....  | 103 |
| 6       | CONCLUSIONES .....   | 105 |
|         | BIBLIOGRAFÍA .....   | 107 |

## INTRODUCCIÓN

La radiactividad es parte natural de nuestro mundo. Desde el principio de los tiempos, los seres vivos han estado expuestos a la radiación proveniente de la tierra, del espacio exterior, del sol e incluso de nuestros propios cuerpos y de los otros organismos vivientes. Naturalmente introducimos a nuestro organismo una dosis importante de radiación, ya que el aire que respiramos, el agua y los alimentos que ingerimos contienen algunos elementos radiactivos (llamados radioisótopos o radionúclidos) de ocurrencia natural.

A estas fuentes emisoras se debe la mayor parte de la radiación que recibimos a diario y no es posible evitarlas ni controlarlas; de hecho, nuestros cuerpos están adaptados a pequeñas cantidades de ella. Sin embargo, a partir del descubrimiento y uso de la energía nuclear, se han generado fuentes y desechos radiactivos sobre los cuales debe ejercerse un control riguroso.

Desde de la primera explosión nuclear en 1945, a la que siguieron una serie de pruebas termonucleares y accidentes en centrales nucleoelectricas, se ha liberado a la atmósfera una cantidad considerable de radionúclidos; estos se han distribuido por todo el planeta por efecto de los vientos, resultando en una precipitación radiactiva muy amplia sobre la superficie terrestre y su consecuente integración a la cadena alimenticia. Muchos no existían originalmente en el ambiente y no deberían de estar presentes, por lo que se consideran contaminantes.

Los terribles efectos que los radionúclidos contaminantes pueden tener en los seres vivos han hecho necesaria su detección y cuantificación en los alimentos producidos cerca de accidentes o eventos nucleares y para monitorear el correcto funcionamiento de las centrales nucleares.

Actualmente este tipo de análisis se ha vuelto necesario en todos los alimentos que circulan en el mundo, dado que el comercio entre los países se esta globalizando y que la energía nuclear es una tecnología cada vez mas usada.

Por todo lo anterior, el presente trabajo es un esfuerzo tendiente a resaltar la importancia de los elementos radiactivos en los alimentos y a que pueda servir como guía para efectuar los análisis de radiactividad en alimentos, que garanticen que tanto éstos como el empleo de materiales y equipos radiactivos son seguros.

# 1 LA RADIOACTIVIDAD Y EL DECAIMIENTO RADIOACTIVO

La radiactividad fue descubierta en 1896 por Henri Becquerel, como consecuencia directa del descubrimiento de los rayos X hecha por Röntgen algunos meses antes. Becquerel estaba trabajando con una sal de uranio, cuando encontró que ésta emitía radiaciones similares a los rayos X, con un considerable poder de penetración. El término actual de radiactividad, no aparece sino un año después, en una publicación sobre las investigaciones químicas de Pierre y Marie Curie acerca de la peblenda, mineral que contiene radio y uranio. Desde esta época, las radiaciones, los materiales que las emiten y sus aplicaciones han sido continuamente estudiadas dando lugar a la creación de nuevas disciplinas científicas. (14)

## 1.1 EL DECAIMIENTO RADIOACTIVO

Los radionúclidos o isótopos radiactivos, son elementos con un núcleo inestable el cual decae o se degrada a intervalos de tiempo predecibles, esto lo hacen perdiendo masa o pura energía, convirtiéndose así en otro elemento si ocurre el primer caso o en el mismo elemento pero en otro estado de energía en el segundo. De esta manera, el decaimiento radiactivo o radiactividad se manifiesta por la emisión de radiación, la cual puede ser de dos tipos generales: radiación electromagnética como los rayos gamma ( $\gamma$ ) y rayos X o radiación de partículas como las partículas alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ). Este es un proceso espontáneo y al azar, independiente de factores externos. La probabilidad de que un núcleo radiactivo particular emita partículas o rayos en la unidad de tiempo adoptada, es independiente del destino de núcleos vecinos y del estado químico de los átomos o de sus condiciones físicas. (14)

La notación internacional para identificar a los núclidos es la siguiente: se usa el símbolo químico que identifica al elemento

y determina su número atómico (Z), y en la esquina superior izquierda se coloca el número de masa (A), que está dada por la suma de protones (Z) y neutrones (N). Por ejemplo, el carbono más abundante en la naturaleza es  $^{12}\text{C}$ , que corresponde a  $Z=6$  y  $N=A-Z=6$ , pero también existe en la naturaleza el  $^{13}\text{C}$ , con  $Z=6$  y  $N=7$  y el  $^{14}\text{C}$  con  $Z=6$  y  $N=8$ . Estas variedades se llaman isótopos y a las que son radiactivas, radioisótopos. (17)

### 1.1.1 LEY DEL DECAIMIENTO RADIOACTIVO

La velocidad de decaimiento se llama actividad (A) y representa el número de núcleos que decaen por unidad de tiempo (por eso usualmente se emplea como unidad desintegraciones por segundo o por minuto). La ecuación de la actividad puede escribirse como:  $A = -dN / dt$

En donde: N = número de átomos radiactivos del radionúclido original y t = tiempo. El signo negativo indica que N disminuye con el tiempo.

La actividad es directamente proporcional al número de átomos radiactivos originalmente presentes, por lo que:  $A = -dN/dt = \lambda N$  (5)

Esta es la ecuación fundamental del decaimiento radiactivo, en donde  $\lambda$  es la constante de decaimiento característica para cada especie radiactiva y representa la probabilidad de desintegración del radionúclido en la unidad de tiempo. (14)

Integrando la ecuación anterior tenemos:

$$N_0 \int^N dN/N = -\lambda \int_0^t dt$$

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

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

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

en donde:  $N_0$  = número inicial de átomos radiactivos y N = número de átomos al tiempo t.

Ya que la actividad es proporcional al número de átomos, podemos escribir también:  $A = A_0 e^{-\lambda t}$  (5)

Trazando una gráfica de los valores de  $t$  contra los de  $A$ , se obtiene la curva de decaimiento característica de cada nuclido. Como  $A$  es una función exponencial de  $t$ , tenemos:  $\ln A = -\lambda t + \ln A_0$ , de modo que trazando la gráfica de  $t$  contra  $A$  en papel semilogarítmico, se obtiene una línea recta característica del nuclido con pendiente  $-\lambda$ . (14)

### 1.1.2 TIEMPO DE VIDA MEDIA FÍSICA

El tiempo necesario para que la actividad inicial de un radionúclido se reduzca a la mitad se conoce como tiempo de vida media física ( $t_{1/2}$ ). Así, después de una vida media  $N = \frac{1}{2} N_0$ , por lo que:  $\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda t}$ ; obteniendo logaritmo natural de ambos lados y cancelando  $N_0$  tenemos que:  $\ln 1/2 = -\lambda t_{1/2}$

$$\text{Así: } t_{1/2} = \ln 2/\lambda = 0.693/\lambda \quad (5)$$

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

Si la vida media de un radionúclido es conocida, es posible trazar su gráfica de decaimiento característico, tomando la actividad inicial como 100% y la mitad (50%) de esta sobre una escala logarítmica de ordenadas empleando como valor correspondiente a la abcisa el de su vida media. Si la vida media es desconocida, la línea recta de decaimiento característica puede obtenerse trazando una gráfica de tiempo transcurrido contra logaritmo de actividad. Tomando cualquier punto como  $A_1$  y el punto  $A_2 = A_1/2$ , tendremos que la diferencia de los valores correspondientes del tiempo será el tiempo de vida media:  $t_2 - t_1 = t_{1/2}$ .

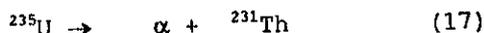
Este método puede usarse para radioisótopos con vidas medias dentro de un intervalo adecuado para la determinación (de algunos minutos a varios días). Para determinar vidas medias extremadamente cortas o largas, es necesario diseñar métodos especiales que involucran el uso de la ecuación de decaimiento radiactivo y el cálculo de la constante de decaimiento. (14) Un método así será desarrollado experimentalmente en el presente trabajo.

## 1.2 TIPOS DE DECAIMIENTO RADIATIVO

Las radiaciones emitidas por el núcleo atómico son de tres especies principales:

1.2.1 PARTÍCULAS  $\alpha$  : Consisten en 2 neutrones asociados con 2 protones, por lo que pueden ser consideradas como núcleos de Helio. Tienen una masa de 4 u.m.a. (unidades de masa atómica) y 2 cargas positivas. La unidad de masa atómica es equivalente a 1/12 de la masa del átomo de  $^{12}\text{C}$ , es decir,  $1.66043 \times 10^{-24}$  g. La masa del protón es igual a 1.007277 u.m.a., la del electrón 0.000549 u.m.a. y la del neutrón 1.008665 u.m.a.

Si un núcleo atómico es radiactivo y emite una partícula  $\alpha$ , pierde 2 unidades en carga y 4 unidades en masa. Este átomo se convierte en otro elemento, con número atómico menor en 2 unidades, y número de masa también menor pues disminuye cuatro unidades al perder 2 neutrones y 2 protones. En general, solo isótopos de los elementos más pesados ( $Z > 82$ ) emiten partículas  $\alpha$  para conseguir su estabilidad. (14) Un ejemplo de esto es lo que sucede con el uranio-235 ( $^{235}\text{U}$ ), que tiene la particularidad de emitir fácilmente partículas alfa, transformándose en un núcleo nuevo:

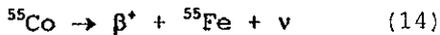


Todas las partículas  $\alpha$  emitidas por un radioisótopo dado tienen la misma energía, es decir son monoenergéticas. (14)

1.2.2- PARTÍCULAS  $\beta$ : Son partículas de masa despreciable, (igual que la del electrón), y presentan carga positiva o negativa.

La partícula  $\beta^-$  o negatrón es un electrón emitido por el núcleo, aumentando este último una unidad su carga positiva al transformarse un neutrón en protón. Por esto, el número atómico aumenta una unidad, permaneciendo el número de masa sensiblemente igual. (17)

La partícula  $\beta^+$  o positrón, es emitida cuando un protón se transforma en neutrón y una partícula de la misma masa que el electrón pero con carga positiva es emitida por el núcleo. Con esto, el número atómico decrece una unidad. Un ejemplo es del  $^{55}\text{Co}$ :



El decaimiento  $\beta^+$  siempre va acompañado de la emisión de otra partícula, el neutrino ( $\nu$ ), y el  $\beta^-$  del antineutrino ( $\bar{\nu}$ ), que no tienen carga ni masa pero comparten la energía sobrante con las partículas  $\beta$ . (17)

Aún cuando las partículas  $\beta$  son similares al electrón, se diferencian de éste en que provienen del núcleo atómico y no están ligadas a ningún átomo. (18)

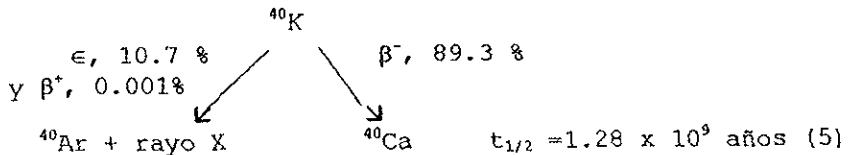
Todas las partículas  $\beta$  de un emisor dado tienen diferentes energías hasta un máximo determinado por el cambio de masa ocurrido en la transformación nuclear, es decir, presentan un espectro de energías que puede ir desde cero hasta una energía máxima. (14)

Existe otro modo de decaimiento que tiene efectos similares al  $\beta^+$  y se llama CAPTURA ELECTRÓNICA, simbolizándose con la letra  $\epsilon$  o CE. En él, un electrón orbital del átomo, usualmente de la capa K mas cercana al núcleo, es capturado por el núcleo que se encuentra excitado. (14) La vacancia resultante en la capa K es rápidamente ocupada por otro electrón orbital de una órbita superior. La

energía potencial perdida por este electrón al disminuir de nivel de energía, es emitida en forma de un rayo X (5) el cual es la única indicación externa de que esta transformación ha tenido lugar.

De esta manera, al capturar el núcleo un electrón, un protón se transforma en neutrón, disminuyendo una unidad el número atómico Z y permaneciendo el número de masa igual. (14)

Un ejemplo de esto es lo que sucede con el radioisótopo potasio-40, que tiene un decaimiento "ramificado" pues sigue varios modos de decaimiento al mismo tiempo, entre ellos la captura electrónica:



1.2.3.- RAYOS  $\gamma$ : Estos son un ejemplo de radiación electromagnética, igual que la luz visible o las ondas de radio pero con mucho menor longitud de onda y en consecuencia mucho mayor energía. (17) No poseen carga ni masa por lo que el decaimiento gama no produce variaciones de masa ni carga en el radioisotopo que lo sufre. (5)

Al igual que en el átomo, en el núcleo existen niveles de energía; la desexcitación de un nivel alto a uno bajo, va acompañada de la emisión de un rayo  $\gamma$ . Como éste proceso ocurre entre dos niveles definidos de energía, la radiación resultante tiene una dimensión energética específica. (14) Lo mismo sucede con los rayos X, pero mientras los rayos  $\gamma$  son emitidos por el núcleo, los rayos X resultan de las transiciones de energía de los electrones fuera del núcleo u orbitales. (17)

Al decaimiento  $\gamma$  se le conoce también como transición isomérica (Tl) ya que el estado excitado del núcleo original y el estado de menor energía del hijo resultante de la emisión  $\gamma$ , son considerados como isómeros nucleares (únicamente cuando el tiempo de vida media del radioisótopo en estado excitado es lo suficientemente grande como para medirla -mayor a milisegundos). (5) Los términos "estado metaestable" o "estado excitado" se usan para describir a los núclidos en estados energéticos por encima del basal, que necesitan emitir energía en forma de radiación gama para alcanzar su estabilidad; esto se indica con la letra m al lado del número de masa. (14) Un ejemplo de esto es:



El decaimiento  $\gamma$  también es un mecanismo que tienen los núcleos de expulsar energía sobrante después de un decaimiento  $\alpha$  o  $\beta$ . Esta expulsión es en forma de un fotón que es la unidad de radiación electromagnética. (17)

### 1.3 INTERACCIONES DE LA RADIATIVIDAD CON LA MATERIA

La forma en que las diferentes partículas y radiaciones interactúan con la materia, determina la severidad del daño fisiológico que cada una cause sobre los sistemas vivos, el modo en que la radiación puede detectarse y sus aplicaciones médicas o farmacológicas.

Existen cinco formas básicas de interacción: ionización, transferencia de energía cinética, excitación molecular y atómica, reacciones nucleares y procesos radiactivos. (5) De principal interés es la ionización que ocurre con los electrones orbitales pues aunque la radiación también puede incidir sobre el núcleo, ésto resulta mucho menos probable ya que mientras el diámetro de un

átomo puede ser de  $10^{-8}$  cm, el de su núcleo es de aproximadamente  $10^{-12}$  cm, o sea 10 000 veces menor. (14)

A la radiactividad se le llama también energía ionizante por su capacidad de separar completamente a un electrón del resto del átomo formándose así un par iónico. Esto se logra impartiendo al electrón una energía igual o superior a su energía de amarre que lo mantiene ligado al núcleo. La unidad de energía que se usa en estos casos es el electrón volt (eV), el cual es la energía cinética que adquiere un electrón al atravesar por una diferencia de voltaje de 1 volt. Por ejemplo, la energía de amarre del electrón en el hidrógeno es de 13.6 eV; para ionizar el átomo de hidrógeno deberá impartírsele esta energía o más. En elementos más pesados (Z mayor) los electrones de la capa K, tienen energías de amarre mayores y se necesita más energía para ionizar: el hierro tiene  $7.1 \times 10^3$  eV, es decir 7.1 KeV y el uranio 115.6 KeV.

La acción de ionizar un átomo rompe su equilibrio eléctrico y cambia sus propiedades químicas.

La característica básica de la radiación ionizante es que proporciona la energía suficiente para producir ionización, concentrada en espacios muy pequeños para poder transmitirla a los electrones atómicos. Una vez ionizados, los átomos pueden recombinarse o formar nuevos compuestos químicos cuyo cambio puede ser permanente o de gran duración. (17)

La ionización específica para cualquier radiación se define como el número de pares iónicos producidos por cada milímetro de trayectoria recorrida en un medio dado. El espesor de materia que las partículas o rayos pueden atravesar antes de perder toda su energía es llamado alcance o rango de la radiación; así, este es función de la energía de las partículas o rayos y de su velocidad. (14)

Según su interacción con la materia, las radiaciones producto de los procesos de decaimiento puede dividirse en dos: las cargadas y las no cargadas.

1.3.1 INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS: Las partículas cargadas ( $\alpha^+$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ ) interactúan principalmente con los electrones de los átomos del medio absorbente a través de muchas series de eventos en los que pierden energía. Por esto su ionización específica es muy grande.(5)

Las partículas alfa, por ser muy pesadas, despiden al electrón sobre el que inciden fuera del átomo sin que su trayectoria sea modificada. Esta trayectoria es muy corta debido a que por su tamaño y peso su ionización específica es muy grande, es decir que entregan su energía en un gran número de colisiones en un trayecto corto.(14)

La ionización específica de las partículas beta es mucho menor por ser mas pequeñas y ligeras y por tener velocidades mayores que resultan en la reducción del tiempo disponible para su interacción con el medio.(5) Su alcance es mayor que el de las partículas  $\alpha$  debido a su mayor velocidad.

El máximo de ionización específica para las partículas cargadas se produce hacia el termino de su trayectoria, cuando su velocidad ha disminuido significativamente.(14)

Como las partículas  $\alpha$  no viajan muy lejos a partir de su fuente radiactiva, no pueden pasar a través de una hoja de papel, la ropa e incluso la capa de células muertas que normalmente protege la piel. Dado que no pueden penetrar la piel humana, no se consideran como un riesgo de exposición externa; esto significa que si las partículas  $\alpha$  permanecen fuera del cuerpo humano, no pueden dañarlo. Las partículas  $\beta$  tampoco pueden viajar muy lejos a partir de su fuente radiactiva; por ejemplo, pueden viajar sólo aproximadamente dos centímetros dentro de un tejido humano y unos cuantos metros en el aire. No son capaces de penetrar algo tan delgado como un libro.(18)

1.3.2 INTERACCIÓN DE RADIACIONES SIN CARGA: Las radiaciones sin carga (rayos  $\gamma$ ) interactúan menos frecuentemente o de manera parcial con los electrones del medio mientras disipan su energía, lo cual puede suceder en unos cuantos eventos; incluso pueden pasar a través de una gran cantidad de materia con poca probabilidad de interactuar con ella, de aquí que las radiaciones sin carga tienen una trayectoria muy larga y son mucho más penetrantes que partículas cargadas de la misma energía.(5)

Son capaces de viajar largas distancias a través del aire y de la mayoría de los materiales; requieren un blindaje de material como plomo o acero para reducir su número, a diferencia de las partículas alfa o beta.(18)

La ionización específica promedio de los rayos  $\gamma$  es 1/100 de la causada por las partículas  $\beta^-$ , pues la mayor parte de la ionización la producen de manera secundaria(14) al transmitir toda o parte de su energía a un electrón que se convierte en un electrón energético que luego produce la mayoría de la ionización del material.(17) La ionización secundaria puede darse mediante tres mecanismos:

- Efecto fotoeléctrico: El fotón  $\gamma$  transfiere toda su energía a un electrón del material, llamado fotoelectrón, generalmente de las capas exteriores del átomo. Esta energía se usa por una parte para liberar al electrón y por otra para darle velocidad.(17) Este proceso se da más frecuentemente en elementos absorbentes de alto número atómico y con radiaciones electromagnéticas de baja energía (menor a 1 MeV).(5)
- Efecto Compton: El fotón original utiliza parte de su energía para sacar un electrón del átomo y desvía su trayectoria para continuarla con menor energía, mayor longitud de onda y menor frecuencia, pudiendo interactuar después con otro átomo. Así, cada efecto Compton es acompañado por un amplio número de excitaciones y ionizaciones producidas por los electrones energéticos o electrones rápidos que tienen buenas posibilidades de producir al menos una

molécula químicamente alterada.(6) Esto sucede cuando el rayo  $\gamma$  tiene mayor energía que en el caso anterior.(14)

• Producción de pares: Cuando la energía del rayo  $\gamma$  incidente es muy alta, al ser absorbido por la materia se transforma en masa en forma de dos partículas  $\beta$ : una positiva y otra negativa.(14) Se da sólo si la energía del fotón es mayor que la energía equivalente a las masas en reposo del positrón y negatrón, es decir 1.02 MeV.(6) Por encima de éste umbral, el exceso de energía aparecerá como energía cinética del par formado. El negatrón a su vez causa ionización y el positrón existe hasta que interactúa con otro electrón para aniquilar el par, produciéndose ahora dos rayos  $\gamma$  de 0.51 MeV cada uno, conocidos como radiación de aniquilación.(14) Este modo de interacción es menos común que los anteriores.(5)

#### 1.4 ORIGEN DE LA RADIACIÓN

La radiación que existe en el planeta puede originarse de manera artificial debido a la actividad humana o de manera natural al producirse continuamente por efecto de los rayos cósmicos en la atmósfera o por las emisiones de núcleos radiactivos que se crearon desde que se formó la tierra (primordiales). De la cantidad de radiación que recibimos del ambiente, existen grandes diferencias de un lugar a otro del planeta.

##### 1.4.1 FUENTES RADIATIVAS NATURALES

Entre las más importantes podemos mencionar:

Radón: Este gas es el átomo radiactivo o radionúclido más importante por su abundancia; escapa al aire desde los depósitos naturales de uranio del suelo y se concentra en los edificios en donde lo inhalamos. Como lo incorporamos a nuestro cuerpo es una fuente interna de radiactividad.(18)

Uranio: En la naturaleza se encuentran los isótopos  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{234}\text{U}$  en 99.27%, 0.72% y 0.006% respectivamente. De su cadena de

decaimiento se originan otros núclidos importantes como el Torio-234 y Torio-230, que decaen a Radio-226, el cual decae a Radon-222 que a su vez se transforma en Polonio-218 y Polonio-238.(17)

Potasio: Nuestro cuerpo contiene de forma natural el isótopo radiactivo del potasio: el potasio-40. Este núclido junto con otros materiales radiactivos que naturalmente se presentan en aire, agua y tierra (como el carbono 14 y el tritio), son incorporados a los alimentos que ingerimos pasando a los tejidos de nuestro cuerpo. Esta radiactividad también es una fuente interna, pero la dosis suele ser menor a la del radón.(18)

Los núclidos anteriores se encuentran ampliamente distribuidos en todos los suelos y otros materiales a base de tierras o rocas como el concreto, tabiques, adobe, yeso, etc.(17) y contribuyen a la llamada:

Radiación de la tierra: Se trata de la radiación gamma procedente de las rocas bajo la superficie terrestre. La tasa de dosis es máxima sobre rocas volcánicas y mínima sobre las sedimentarias. Además, las personas que habitan en edificios de granito reciben dosis hasta dos veces más elevadas que las que viven en edificios de madera.

Radiación cósmica: Proviene del espacio exterior y con ella se forman los núclidos llamados cosmogénicos. Los rayos cósmicos constan de núcleos, principalmente protones y partículas  $\alpha$  que al ir penetrando en la atmósfera, chocan con los núcleos atómicos de los gases produciendo cascadas de nuevas reacciones, parte de las cuales llega a la biosfera. Algunas de estas reacciones producen neutrones que dan lugar a la reacción nuclear:  $^{14}\text{N} + n \rightarrow p + ^{14}\text{C}$ , con el nitrógeno de la atmósfera; el carbono-14 producido se mezcla con el resto del carbono y  $\text{CO}_2$  atmosféricos y pasa a formar parte integral de todo ser vivo. Por emitir partículas  $\beta$  y tener una larga vida media, se transforma en una fuente importante de radiación a la que todos estamos expuestos. Con el tritio sucede lo mismo.(17) Las tasas de dosis de radiación cósmica aumentan con la

altitud, al perderse el efecto protector de la atmósfera terrestre; por esto, la tasa de dosis anual para las personas que viven por encima del nivel del mar aumenta en 0.03 mSv por cada 1000 metros de altitud. Así, cuando volamos en un avión a gran altitud, aumenta nuestra exposición a los rayos cósmicos y dado que la fuente es externa, la dosis que recibimos depende de la duración del vuelo. Personas que viven al norte reciben más radiación cósmica que las que viven al sur; por ejemplo, una persona que viva en Escocia recibirá un 20% más de tasa de dosis de radiación cósmica que una persona que viva en Grecia.(18) Además se ha observado que en virtud del campo magnético terrestre, esta radiación es mas intensa cerca de los polos que del ecuador.(17)

Los fumadores reciben una dosis de radiactividad extra debido al Polonio-210 que se encuentra en el tabaco como resultado del decaimiento radiactivo del radón del aire y que se deposita en las hojas de las plantas de tabaco.(9)

#### 1.4.2 FUENTES RADIATIVAS ARTIFICIALES

Como fuentes radiactivas artificiales o generadas por el hombre podemos mencionar:

Rayos X: De los rayos X empleados en medicina recibimos una dosis significativa de radiación; por ser generados por el aparato de rayos X, ésta es una fuente externa a nuestro cuerpo, por lo que la dosis se interrumpe cuando se desconecta el aparato.

La aplicación de materiales radiactivos por el hombre es también responsable de cierta radiactividad adicional en nuestro cuerpo. La más importante se debe al uso de materiales radiactivos en medicina. Otra dosis es la provocada por la lluvia radiactiva resultante de la explosión de las primeras bombas atómicas sobre Japón en 1945 y de las pruebas nucleares en la atmósfera. Accidentes en reactores nucleares aumentaron esa lluvia radiactiva alrededor del mundo y dieron lugar a grupos nuevos de personas que recibieron grandes dosis de radiación ionizante. Además, cada año,

una dosis muy pequeña se produce durante el funcionamiento normal de las centrales nucleares.

El cuadro # 1 muestra el porcentaje de dosis de radiación anual media que reciben las personas en Europa:

Cuadro # 1

| FUENTE DE RADIACIÓN   | PORCENTAJE |
|---|------------|
| Gas radón inhalado del suelo  | 51 %       |
| Radiactividad en comidas y bebidas  | 12 %       |
| Rayos gamma del suelo y edificios   | 14 %       |
| Rayos X empleados en medicina   | 12 %       |
| Rayos cósmicos  | 10 %       |
| Centrales Nucleares, lluvia radiactiva, dosis de radiación en el trabajo y vivienda | 1 %        |

Fuente: referencia (18)

Las dos primeras fuentes señaladas producen emisiones internas, pues son introducidas a nuestros cuerpos; a ellas se debe la mayor parte de la radiación que recibimos. Como puede verse, aproximadamente el 87 % de las dosis que recibimos tiene su origen en fuentes naturales y solo el 13 % en fuentes artificiales. (18)

## 2 SEGURIDAD RADIOLÓGICA

Debido a los efectos que la radiación ionizante tiene sobre los organismos vivos, resulta fundamental tomar las medidas necesarias para protegerse de ella. En general, decimos que las fuentes de radiación a las que estamos expuestos pueden ser externas (fuera de nuestro cuerpo) e internas (material radiactivo que entra al cuerpo por inhalación, ingestión o heridas en la piel); (14) los radionuclidos que ingresan al cuerpo se conocen como emisores internos. (2)

En este estudio son de principal interés las fuentes de radiación internas por estar tratando con radiactividad en alimentos que son ingeridos; sin embargo, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR) ha establecido recomendaciones generales para el uso seguro de la radiación, aplicables a todo tipo de fuentes radiactivas y que pueden considerarse como los principios de la seguridad radiológica:

a) No debe adoptarse ninguna práctica que involucre radiación a menos que produzca un beneficio neto.

b) Las exposiciones a la radiación deben mantenerse tan bajas como sea razonablemente posible (en idioma inglés se usan las siglas ALARA, que vienen de As Low As Reasonably Achievable).

c) El equivalente de dosis que reciba cualquier individuo no debe exceder los límites determinados por la CIPR para cada circunstancia. (16)

### 2.1 UNIDADES EN QUE SE EXPRESA O MIDE LA RADIATIVIDAD

Para un entendimiento correcto del manejo de la radiactividad resulta necesario definir las unidades en que la radiactividad como tal puede medirse, aquellas en las que se expresa la cantidad de energía de radiación depositada en un material (dosis de

radiación), así como términos descriptivos empleados en protección radiológica sobre cómo la dosis de radiación se deposita, los métodos para calcular esta dosis y cómo la energía de radiación depositada en un tejido puede afectar a los humanos.

### 2.1.1 UNIDADES DE ACTIVIDAD .

Son empleadas para describir el número de átomos de un material radiactivo que decaen (emiten radiación) en un periodo de tiempo dado.

Curie (Ci): cantidad de cualquier material radiactivo que sufre  $3.7 \times 10^{10}$  desintegraciones nucleares por segundo (dps) o  $2.22 \times 10^{12}$  desintegraciones por minuto (dpm).

Becquerel (Bq): equivale a una desintegración por segundo (dps); es decir a  $2.7 \times 10^{-11}$  Ci.

Rutherford (Rd): es una unidad mucho menos usada y equivale a  $10^6$  dps, o bien  $2.7 \times 10^{-5}$  Ci.

Así,  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 3.7 \times 10^4 \text{ Rd}$

### 2.1.2 UNIDADES DE DOSIS DE EXPOSICIÓN:

La dosis de exposición es una medida de la ionización producida por la radiación conforme esta viaja por un medio. Se expresa en:

Roentgen (R): Puede expresarse como la cantidad de radiación X o  $\gamma$  recibida por un Kilogramo de aire en condiciones estándar de Presión y Temperatura (CSPT) que produce un número de pares de iones equivalentes a  $2.58 \times 10^{-4}$  Coulombs. Como la carga de un ion es  $1.602 \times 10^{-19}$  Coulombs, esto equivale a que se produzcan  $1.61 \times 10^{15}$  pares de iones por Kg de aire. En resumen:

$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ Coulombs/Kg de aire} = 1.61 \times 10^{15} \text{ pares de iones/Kg de aire, en CSPT.}$

Sabiendo que la energía necesaria para cada ionización del aire es 34 eV, equivalente a  $5.4 \times 10^{-19}$  Joules:  $1 \text{ R} = 0.00869 \text{ J/Kg de aire.}$

Estudios realizados han demostrado que en tejido la energía de ionización es diferente que en aire:  $1R=0.0096 \text{ J/Kg}$  de tejido. (16)

### 2.1.3 UNIDADES DE DOSIS ABSORBIDA

Como el Roentgen deposita diferentes cantidades de energía según el material que recibe la exposición, se ha definido la dosis absorbida (D) como la cantidad de energía depositada por unidad de masa de cualquier material. Usualmente se emplea para radiación absorbida en tejidos. (5)

En el S.I. la unidad es el Gray (Gy) que corresponde a  $1 \text{ J/Kg}$  de material.

La unidad antigua es el rad (por sus siglas en inglés "radiation absorbed dose", es decir dosis de radiación absorbida):  $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ J/Kg} = 100 \text{ erg/g}$ . Así,  $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$ .

Como un Roentgen deposita en tejido una dosis de 0.96 rad (casi un rad) estas dos unidades se confunden con frecuencia. (16)

### 2.1.4 UNIDADES DE DOSIS EQUIVALENTE

Dosis iguales de radiación absorbida producen efectos biológicos de magnitud diferente según el tipo de radiación de que se trate, debido a esto se ha establecido la dosis equivalente.

La severidad del daño molecular causado está relacionada con la ionización específica de la radiación y con su poder de penetración; (5) una cantidad empleada en seguridad radiológica para expresar esto es la Energía Linear de Transferencia (LET por sus siglas en inglés) que es la cantidad de energía perdida por la radiación por unidad de longitud de trayectoria (9) y se expresa en Kiloeléctron volts (KeV) por micrómetro ( $\mu\text{m}$ ).

El LET representa la velocidad a la cual la energía de las partículas cargadas se transfiere a los átomos y es función de la energía y carga de la partícula: aumenta conforme la carga de la partícula radiactiva también lo hace, así como con la disminución

de la energía y velocidad de la radiación. Debido a que el LET aumenta conforme la velocidad de la partícula disminuye, la capacidad de una partícula para ionizar, es mayor conforme esta va viajando más despacio al internarse en los tejidos.

Los electrones, rayos  $\gamma$  y rayos X se caracterizan por tener LET baja, con lo cual la distancia entre los eventos de ionización es larga; radiación con LET alta es característica de partículas  $\alpha$ , protones y neutrones, en este caso, la distancia entre los eventos de ionización es pequeña en la escala del núcleo. (9)

La efectividad de una partícula radiactiva para causar ionización, y por lo tanto daño biológico, aumenta conforme lo hace su LET. Por esto, el LET es un indicador de la potencia de una partícula para causar daño a los tejidos.

Por lo anterior, para estimar el daño biológico que cada partícula o energía ionizante puede provocar, se ha establecido un factor de calidad (Q) para cada tipo de radiación el cual está relacionado con el LET:

Cuadro # 2. Relación entre Q y LET.

| LET (KeV/ $\mu$ m) | Q       |
|--------------------|---------|
| < 3.5              | 1       |
| 3.5 - 7            | 1 - 2   |
| 7 - 23             | 2 - 5   |
| 23 - 53            | 5 - 10  |
| 53 - 175           | 10 - 20 |

Fuente: referencia (5)

Como el LET de cada partícula o radiación emitida es distinto, cada una tiene un valor Q característico que se muestra en el cuadro # 3.

Cuadro # 3. Valores Q para algunas radiaciones comunes.

| TIPO DE RADIACIÓN                               | Q        |
|---|----------|
| Rayos X o $\gamma$                              | 1        |
| Partículas $\beta^-$ o $\beta^+$ y electrones   | 1        |
| Partículas $\alpha$ y fragmentos de fisión      | 20       |
| Neutrones rápidos y protones (arriba de 10 MeV) | 10 (20)* |
| Neutrones lentos                                | 5        |
| Neutrones térmicos                              | 2.3 (5)* |

\*Son los nuevos valores propuestos por la Comisión Nacional de Protección Radiológica (NCRP por sus siglas en inglés).

Fuente: referencia (14) y (12)

Existe también la EBR (Efectividad Biológica Relativa), término empleado en estudios experimentales de radiobiología muy precisos en lugar del Q. La EBR se usa para comparar la efectividad de un tipo de radiación con relación a otra para producir cierto efecto. La radiación empleada con propósitos de comparación, puede ser rayos X o radiación gamma de cobalto-60. Así:

$$EBR = D_a / D_b \quad \text{en donde:}$$

$D_a$  = Dosis de radiación estándar (usualmente en rad) que produce cierta cantidad de un efecto dado (por ejemplo, 50% de sobrevivencia de células específicas).

$D_b$  = Dosis de otra radiación para producir el mismo efecto.

Por lo tanto, la EBR es una comparación de dosis diferentes produciendo la misma magnitud de un efecto específico(2) y tiene utilidad limitada para estimar efectos biológicos generales.(5)

La dosis equivalente se obtiene multiplicando la dosis absorbida por el factor de calidad Q, o bien, por la EBR.

Las unidades usadas son el Siervert (Sv), definido como:

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \times Q \quad \text{o} \quad 1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \times \text{EBR}$$

O la unidad antigua, el rem ("roentgen equivalent man"):

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times Q \quad (\text{o EBR}); \text{ y } 1 \text{ rem} = 0.01 \text{ Sv} \quad (16)$$

Para fines de evaluación de daño biológico, se considera que un Roentgen de intensidad de campo produce un rad de dosis absorbida en tejidos. (14)

Obviamente, la exposición a la radiación puede ser solo de fracciones de rad o rem: milirad, microrad, milirem, microrem. (2)

### 2.1.5 UNIDADES DE DOSIS EFECTIVA

La sensibilidad a la radiación de cada uno de los órganos de nuestro cuerpo es diferente. Los genitales, que responden aún a dosis bajas de radiación, representan una fracción de 1/5 (0.20) del efecto total de la radiación sobre el organismo. Dicha fracción constituye el factor de ponderación del tejido, y la dosis equivalente se multiplica por este factor para obtener la dosis efectiva, que se expresa también en Siervert o rem.

De este modo la dosis efectiva puede calcularse para cada tipo de radiación ionizante y para la exposición de una parte cualquiera del cuerpo a la radiación. (18)

Cuadro # 4.

Factores de ponderación para algunos órganos y tejidos.

| ÓRGANO                                    | FACTOR DE PONDERACIÓN DEL TEJIDO |
|---|----------------------------------|
| Genitales                                 | 0.2                              |
| Medula ósea roja, colon, pulmón, estomago | 0.12                             |
| Vesícula, seno, hígado, esófago, tiroides | 0.05                             |
| Piel, superficie ósea                     | 0.01                             |
| Resto de cuerpo en su conjunto            | 0.05                             |

Fuente: referencia (18)

### 2.2 EFECTOS BIOLÓGICOS DE LA RADIACIÓN (RADIOTOXICIDAD)

La energía radiactiva causa daños orgánicos en virtud de su capacidad de penetrar la materia y ser absorbida por los átomos de las células y tejidos vivos, ionizándolos.

La clase y magnitud del daño dependen de: tipo y energía de radiación, dosis absorbida (energía depositada), zona afectada, tiempo de exposición, y tipo de exposición (interna o externa). (16)

Esto último resulta muy importante si consideramos el poder de penetración de las diferentes partículas y energías ionizantes.

Así, los emisores de partículas  $\alpha$  representan un mínimo de peligro de radiación externa, sin embargo, internamente causan un daño biológico muy grande pues disipan una gran cantidad de energía en un volumen pequeño debido a su alta LET. Los emisores de partículas  $\beta$  representan en general un riesgo mayor de radiación externa que los  $\alpha$  ya que dependiendo de la energía de las partículas tienen mayor alcance y penetración; dentro del organismo su energía se disipa en volúmenes mayores (debido que su LET es menor), pero aún resulta suficientemente localizada para producir daños importantes a los tejidos donde son fijadas. Los emisores X y  $\gamma$  representan un peligro tanto de radiación interna como externa debido a su gran poder de penetración y alcance; como su LET es aún menor, el daño producido a los tejidos también lo es. (14)

El daño celular puede provocarse por la formación de radicales libres altamente reactivos, resultantes de la ionización producida por la transferencia de energía de las partículas a átomos específicos en los tejidos. Los radicales libres pueden reaccionar con moléculas blanco críticas de las células como proteínas, enzimas y ácidos nucleicos, provocando daños celulares diferentes a los que causan los tóxicos químicos. Por esto la toxicidad de la radiación difiere de la toxicidad química en que la primera proviene de la conversión de componentes celulares a formas tóxicas mediante la absorción de energía de la radiación ionizante.

La evidente efectividad de la radiación ionizante para producir efectos tóxicos, puede visualizarse comparándola con la energía calorífica: mientras que la última se distribuye eventualmente entre todas las moléculas en una cantidad de tejido dada, la energía de las radiaciones ionizantes puede transferirse a

pocas moléculas que son bombardeadas con energía de forma concentrada, lo cual es suficiente para romper cualquier enlace químico. Por ejemplo: Una dosis máxima estimada de 3000 a 10,000 rad proporcionada accidentalmente a la palma de la mano a partir de una fuente de 25-curie  $^{192}\text{Ir}$ , ha demostrado producir quemaduras de irradiación severas y extensivas así como necrosis. En términos de calorías una dosis máxima equivalente de 10,000 rad equivale a solo 0.0239 cal/g ( $10,000 \text{ rad} \times 100 \text{ erg/g/rad} \times 2.39 \cdot 10^{-8} \text{ cal/erg}$ ). Esta cantidad de calorías pueden elevar la temperatura del tejido solo 0.0239 °C, cantidad insignificante fisiológicamente. Una dosis mucho menor de 10 000 rad puede provocar serias enfermedades por radiación, que en algunos casos llevan a la muerte.(2)

Los efectos biológicos producidos por las radiaciones pueden clasificarse en:

- No estocásticos o deterministas - Estocásticos o probabilísticos

2.2.1 EFECTOS NO ESTOCÁSTICOS: se presentan al rebasar cierta dosis umbral de radiación. La severidad aumenta con la dosis(16), es decir, es proporcional a la dosis absorbida por encima del umbral(18); para dosis debajo del umbral no habrá efectos clínicamente detectables.

Para estos casos, la protección consiste en prevenir los efectos no excediendo los umbrales definidos en cada caso. Efectos de este tipo causados por la radiación ionizante son las quemaduras(16), los efectos reproductivos, lesiones en los ojos, médula ósea y en la totalidad del cuerpo (vómitos, enrojecimiento de la piel, muerte).(18)

2.2.2 EFECTOS ESTOCÁSTICOS: Son aquellos cuya probabilidad de ocurrencia se incrementa con la dosis recibida y con el tiempo de exposición. No tienen una dosis umbral para manifestarse por lo que cualquier dosis dada produce un efecto; para obtener un efecto cero

se requiere una dosis cero. Pueden o no ocurrir, no hay un estado intermedio. El efecto estocástico representa un pequeño aumento en las enfermedades ya existentes (expresado como % de aumento de riesgo), por lo que es imposible reconocer los efectos de las dosis bajas. Ejemplos de estos efectos son los genéticos, carcinogénicos, teratogénicos y de acortamiento de la vida. (18)

La protección radiológica trata de limitar en lo posible los efectos estocásticos al mantener las dosis lo más bajas posible. (16)

### 2.3 EFECTOS TÓXICOS ESPECÍFICOS, RELACIONADOS CON BAJOS NIVELES DE RADIONÚCLIDOS

Los blancos a los que los efectos tóxicos de dosis bajas de radiación ionizante pueden dirigirse son los siguientes:

2.3.1 EFECTOS REPRODUCTIVOS: Los efectos de dosis bajas de radiación ionizante en la fertilidad pueden ser verdaderamente dramáticos. Hasta ahora, se ha observado disminución en las cuentas de espermatozoides en humanos accidentalmente expuestos a radiación ionizante. La aspermia se desarrolla de 2 a 3 meses después de la exposición, seguida de hipospermia varios meses después. Si la radiación a todo el cuerpo no excede a 700 rad, la condición anterior es temporal y se da la recuperación. Sin embargo, decrementos importantes en la cuenta de espermatozoides ocurren incluso cuando la exposición a la radiación en todo el cuerpo es tan baja como 1 a 6 rad; la esterilidad permanente ha sido reportada en pacientes cuyas gónadas recibieron dosis de irradiación gamma estimadas en alrededor de 1000 rad.

Muchas partes de los órganos reproductivos masculinos son radioresistentes, pero varios tipos de células de las series espermatogénicas -especialmente las más primitivas de este grupo, las espermatogonias- son radiosensitivas. Dosis de radiación pequeñas a moderadas pueden provocar necrosis, inhibición mitótica, daño cromosómico y cambios genéticos. Conforme las células

formadoras de esperma maduran se vuelven más radioresistentes, requiriendo mayores dosis de radiación antes de ser transformadas morfológicamente. Los espermatozoides maduros son muy radioresistentes, por eso incluso dosis masivas de radiación no causan efectos en su movilidad o morfología.

Se ha probado que cuando una cantidad radiación se transmite en dosis muy pequeñas a lo largo de un periodo de años, en el cual la dosis total es muy alta, la espermatogénesis aparentemente no se ve afectada; todo lo contrario, sucede si una dosis moderadamente alta se suministra en un periodo de tiempo corto.

Puede incurrir daño en espermatozoides morfológicamente radorresistentes a partir de altas dosis de radiación, como lo indica su incapacidad para fertilizar el óvulo. Aún mas, dosis pequeñas pueden provocar daño genético.

Algunas partes de los órganos reproductivos femeninos son también radioresistentes, pero el ovario y las células granulosas de los folículos no lo son. Folículos maduros relativamente radioresistentes se presentan en la mayoría de las especies, por eso la ocurrencia de esterilidad transitoria o incluso parcial se demora después de exposiciones a dosis de radiación pequeñas a moderadas. Los folículos pequeños radioresistentes que sobreviven a la radiación, aseguran la renovación de la fertilidad; sin embargo, como sucede con las células de esperma, en estas células puede ocurrir daño genético o cromosómico, resultando en daño teratogénico.

Dada la capacidad de recuperación de las células reproductivas radioresisistentes, dosis bajas de radiación producen sólo infertilidad transitoria, a menos que los tejidos espermatogénicos estén totalmente dañados. En los humanos, el periodo de esterilidad que sigue de la exposición a pequeñas dosis de radiación, puede durar de uno a tres años. Sin embargo, dosis moderadas de radiación pueden producir esterilidad permanente. (2)

2.3.2 EFECTOS TERATOGENICOS: Las evidencias apuntan al hecho de que los cromosomas son sumamente sensibles a la radiación ionizante, incluso más que cualquier otra parte de la célula. La exposición de los cromosomas a la radiación ionizante puede resultar en varios tipos de daño cromosómico, los cuales pueden producir anomalías congénitas. El daño a las células germinativas transmisible a los descendientes se considera como daño genético, y será discutido posteriormente.

El daño identificable a los cromosomas después de su exposición a la radiación ionizante (por ejemplo formación de cromosomas dicéntricos) es la base de la dosimetría citogenética (empleando linfocitos periféricos), mediante la cual puede actualmente estimarse la dosis de radiación transmitida a un individuo. Esto se hace estableciendo in vitro una curva dosis-respuesta, empleando una fuente de radiación similar a la que ha causado el daño in vivo. La cantidad de radiación recibida in vivo es estimada a partir del número de tipos específicos de daño cromosómico correspondientes con la dosis de radiación in vitro. Las curvas dosis-respuesta, en muchos casos extrapoladas al origen, sugieren la ausencia de un umbral.

Las anomalías congénitas causadas por la radiación ionizante han sido documentadas en estudios tanto con animales como con humanos. Por ejemplo, la administración en animales de 1 rad/día a lo largo de su período gestacional, ha demostrado producir cierto grado de acortamiento de vida así como anomalías en el desarrollo de las gónadas y algunos otros órganos. Estudios de individuos que estaban en el seno materno cuando las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki fueron arrojadas y que vivían cerca del hipocentro, han demostrado que es común se presente microcefalia (tamaño de cabeza anormalmente pequeño), así como retraso mental. La microcefalia se ha presentado incluso en aquellos que recibieron dosis tan pequeñas de radiación como 5 a 10 rad y los estudios señalan que el tamaño pequeño de el cráneo

indica una falla del cerebro para desarrollarse totalmente; por esto, la microcefalia en la mayoría de los casos está asociada con retraso mental.(2)

2.3.3 ACORTAMIENTO DE LA VIDA: El acortamiento de la vida equivalente a 25 a 50% del lapso normal ha sido reportado en el caso de animales expuestos a dosis de radiación cercanas a las letales. A dosis menores, de 200 a 500 rad, el acortamiento observado ha sido de 2 a 4% por cada 100 rad. Los animales estudiados murieron por las mismas causas o enfermedades que los del grupo control con el que se trabajó, excepto que los primeros se volvieron más susceptibles a contraer enfermedades fatales a una edad más temprana; es decir, los animales envejecieron prematuramente. Debe considerarse que en este caso los niveles de radiación empleados fueron relativamente grandes. No existen datos claros sobre el efecto de acortamiento de vida para niveles bajos de radiación.(2)

2.3.4 EFECTOS GENÉTICOS: En experimentos con ratones empleando dosis de radiación de 0.001, 0.009, 0.8, 0.9, y 90.0 R/min, se encontró que las mutaciones en las espermatogonias aumentaban esencialmente de forma lineal con la dosis; no se observó umbral mutacional. Aparentemente el daño mutacional depende de la razón de dosis, por lo que una dosis dada prolongada o fraccionada durante periodos largos de tiempo es menos dañina mutacionalmente. Con base en estos datos y otras investigaciones, el comité Asesor en Efectos Biológicos de la Radiación Ionizante (BEIR por sus siglas en inglés) para la Academia Nacional de Ciencias (NAS), estimó en 1977 el daño genético como 0.14 casos adicionales y elevando a un número extremo, 3 casos/3.6 millones de nacimientos por año, contra los antecedentes naturales de 340,000 bebés genéticamente defectuosos/3.6 millones de nacimientos.(2)

2.3.5 EFECTOS CARCINOGENICOS: Cáncer es el nombre general para un grupo de padecimientos en los cuales el control celular homeostático normal se pierde y las células crecen continuamente amontonándose, invadiendo y destruyendo los tejidos normales que las rodean.(1) Los efectos carcinogénicos de la radiación ionizante en humanos son bien conocidos. La evidencia frecuentemente citada es la de los mineros de minas de uranio (cáncer de pulmón), radiólogos y dentistas (leucemia), sobrevivientes japoneses de la bomba atómica (leucemia y cáncer de pecho), pacientes irradiados con rayos X (leucemia y tumores pulmonares), niños irradiados por diversos padecimientos de cuello y pecho (leucemia, cáncer de huesos, de tiroides y otros cánceres de cabeza y cuello), pacientes con tuberculosis y *mastitis postpartum* irradiados con rayos X (cáncer de pecho) y niños y madres irradiados durante el embarazo (leucemia). Estos efectos junto con aquellos observados en animales han establecido la carcinogenia de la radiación ionizante.(2) Estimaciones oficiales de la CIPR indican que el riesgo estocástico o probabilista adicional de que una persona muera de cáncer por exponerse a la radiación ionizante, es del 5% por cada siervert recibido; con dosis menores el principal efecto son otros cánceres que se manifiestan mucho más tarde y que no aparecerían hasta una edad muy avanzada de la persona expuesta.(18)

Un aspecto importante del cáncer por radiación es la ausencia aparente de umbral de dosis segura. Esto proviene del hecho de que el daño cromosómico causado por la radiación ionizante tampoco muestra un umbral aparente.(2) Esta conexión puede deberse a que el proceso carcinogénico parece estar controlado por los oncogenes (genes asociados con la proliferación celular normal que han sufrido mutaciones debido a la radiación ionizante y que transforman células pre-malignas en células malignas).(1) La ausencia de umbral debe ser considerada en términos de población general, en donde se esperan diferencias estadísticas en sensibilidad y ocurrencia del llamado cáncer "espontáneo".(2)

### 3 LA RADIOACTIVIDAD EN LOS ALIMENTOS

Los radionúclidos pueden existir en los alimentos en muy pequeñas cantidades, pero su presencia no es significativa en términos de toxicidad química. Sin embargo, sus niveles en los alimentos cobran importancia desde el punto de vista de diferentes perspectivas toxicológicas:

- 1.- Con base en el concepto de no-umbral, los radionúclidos pueden provocar riesgos de carcinogénesis, mutagenia, y teratogenia.
- 2.- Diversos radionúclidos poseen afinidades especialmente fuertes por ciertos órganos o tejidos, por lo cual la dosis relativa para ese órgano o sección de un órgano puede ser varias veces mayor que la dosis ingerida o absorbida.
- 3.- Estas afinidades pueden causar que los radionúclidos se acumulen con el tiempo a dosis aún mayores.
- 4.- Excepto por el mecanismo de excreción y por el decaimiento radiactivo, el cuerpo no posee un mecanismo de detoxificación específico para los radionúclidos aunque otras sustancias o procesos corporales pueden mitigar sus efectos.
- 5.- Diversos radionúclidos tiene largos tiempos de vida media (de miles de millones de años inclusive) por lo que su actividad radiactiva puede persistir a lo largo de la vida de una persona.

Las consideraciones anteriores resumen la importancia toxicológica de los radionúclidos; varias serán ampliadas en secciones posteriores. De cualquier manera, los siguientes puntos deberán ser tomados en cuenta:

- 1.- La presencia, persistencia y niveles de radionúclidos en alimentos y agua.
- 2.- La manera en que estos radionúclidos ingresaron a los alimentos.
- 3.- Los factores y condiciones que pueden provocar un incremento en la concentración de los radionúclidos en los alimentos.

- 4.- Las formas de evitar estos incrementos.
- 5.- Las distribuciones geográficas y ecológicas de los radionúclidos y los factores que los afectan.
- 6.- Los efectos biológicos de los núclidos radiactivos y los factores que mitigan o exacerban estos efectos.
- 7.- Las relaciones toxicológicas de los radionúclidos con otras sustancias.

El conocimiento de estos puntos actualmente está incompleto y muy fragmentado, pero desde que la primera reacción nuclear en cadena exitosa se llevó a cabo, se han logrado avances en el estudio de la toxicología radiactiva.(2)

### 3.1 IMPORTANCIA TOXICOLÓGICA DE LOS RADIONÚCLIDOS EN LOS ALIMENTOS

Los radionúclidos de interés en la toxicología de alimentos son los llamados emisores internos que consiguen entrar al cuerpo al ingerirlos. Sus efectos histopatológicos son esencialmente similares a los producidos por radiaciones de fuentes externas y que fueron explicados en el capítulo anterior, aunque cantidades suficientes de algunos de ellos pueden también ejercer influencias químicas sobre las células y tejidos.

Los efectos de la radiación provocados por los emisores internos están condicionados cuantitativamente por los siguientes factores:

- 1.- Las cantidades administradas.
- 2.- El modo de introducción de los radionúclidos al cuerpo (ruta de administración).
- 3.- Patrones de distribución y retención, incluyendo localización específica o concentraciones dentro de la estructura de los tejidos y radiosensibilidades de estos.
- 4.- Tiempo de vida media física y tiempo de vida media biológica del radionuclido.

5.- Tipo, energía y ionización específica (LET) de los rayos o partículas emitidas.

6.- Características del material radiactivo ingerido. (1)

A continuación se explican estos factores:

3.1.1 CANTIDADES ADMINISTRADAS: Como es de esperarse, entre mayores sean las concentraciones de emisores radiactivos que ingresen al cuerpo, el riesgo de que estos causen daños será mayor; precisamente a esto se debe que se fijen límites máximos permisibles de radionúclidos en alimentos, agua, aire, etc.

3.1.2 MODO DE INTRODUCCIÓN: Dependiendo de la ruta de entrada (si es ingerido, inhalado, absorbido a través de la piel o inyectado en diferentes sitios), un radioisótopo de cualquier elemento químico, presentará diferentes problemas patológicos. (1)

La ruta de entrada influye en la dosis de radiación; por esto, para los radionúclidos ingeridos, el papel del aparato gastrointestinal tendrá un efecto significativo sobre la dosis recibida por el tejido blanco. Además, la presencia de otros componentes en la dieta puede minimizar o realzar la dosis efectiva al reaccionar con el total de los radionúclidos. Por ejemplo, el calcio y el fosfato disminuirán la absorción del estroncio-90, mientras que algunos quelantes como los citratos y aminoácidos pueden aumentarla.

3.1.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS RADIONUCLIDOS EN EL CUERPO: Esta influye fuertemente en su toxicidad. Así, aquellos radionúclidos que se concentran localizadamente en tejidos específicos, tendrán un mayor impacto en esos tejidos. Por ejemplo, el yodo-131 se deposita principalmente en la glándula tiroides, por lo cual otros tejidos no se ven afectados por este radionúclido significativamente. De manera similar, el estroncio-90, como el

calcio, tiene su efecto principal en los huesos y serán estos y sus cercanías los que dañará principalmente. Por otro lado, el Cesio-137, al igual que el potasio, se encuentra distribuido ampliamente por todo el cuerpo, pudiendo afectar diversos tejidos. (2)

Las características químicas de la sustancia radiactiva son muy importantes para determinar las regiones del cuerpo en las que se depositará, ya que esta sufrirá los mismos procesos metabólicos que la sustancia natural no radiactiva de la misma composición química. Si un elemento no se presenta naturalmente en el cuerpo, seguirá el mismo proceso metabólico que el de un elemento de ocurrencia natural con propiedades químicas similares. Por ejemplo el estroncio y radio son análogos químicos del calcio por lo que se depositan, concentran y fijan en los huesos; debido a esto son llamados "buscadores de huesos". Estas sustancias dañan la medula ósea y el hueso produciendo tumores óseos y otros neoplasmas. (1)

Según sus principales sitios de distribución y concentración en el cuerpo, algunos radionuclidos pueden clasificarse como se muestra en el cuadro # 5:

Cuadro # 5.

Localización de algunos radionúclidos en los órganos y tejidos.

| Componente mineral de los huesos | Hígado, riñón, tejido óseo, órganos hematopoiéticos | Eritrocitos | Distribución generalizada |
|----------------------------------|---|-------------|---------------------------|
| Calcio                           | Itrio   | Fierro      | Tritio                    |
| Estroncio                        | Tierras raras                                       | Telurio     | Carbono                   |
| Radio                            | Polonio   | Cobalto     | Potasio                   |
| Uranio                           | Plutonio  | Polonio     | Cesio                     |
| Magnesio                         | Torio   | Cromo       | Sodio                     |
| Plomo                            | Otros actínidos                                     |             | Fósforo                   |

Fuente: referencia (1)

Mientras más generalizada sea la distribución, la patología es mas parecida a la producida por irradiación del cuerpo entero por fuentes de radiación externas. (1)

Esta distribución en el cuerpo influye grandemente en el daño que cada radionuclido pueda provocar, especialmente en el caso de los emisores alfa pues ellos depositan energía de manera muy

localizada y tienen una mayor efectividad biológica relativa comparados con los emisores beta y gama, por esto, al concentrarse en un órgano específico pueden provocar la pérdida de funcionalidad de éste y conducir a la muerte. En general, se considera que para los efectos estocásticos la exposición uniforme de órganos o cuerpo entero es más peligrosa, mientras que para los no estocásticos sucede lo contrario. (8)

Los efectos carcinogénicos que los emisores internos pueden tener en el cuerpo, dependen además de la susceptibilidad de los tejidos irradiados para la inducción de respuesta neoplástica. El grupo más amplio de tumores es causado por isótopos que se distribuyen de manera relativamente uniforme dentro del cuerpo. Los radioisótopos con localización selectiva tienden a aumentar el desarrollo de neoplasmas en los tejidos en los que se localizan y sus cercanías, dependiendo esto considerablemente de la penetración en el tejido de las radiaciones emitidas. (1)

**3.1.4 INTERVALO O GRADO DE RETENCIÓN EN EL CUERPO:** La retención en el cuerpo depende tanto del decaimiento físico de los núclidos como de sus intervalos de excreción; ambos se expresan usualmente como vidas medias.

La vida media efectiva ( $T_e$ ) de un radionúclido se encuentra relacionada con la vida media física ( $T_p$ ) y la vida media biológica ( $T_b$ ). La vida media biológica es función del intervalo de excreción y es específica para cada radionúclido. La relación que guardan se muestra en la siguiente ecuación:  $T_e = T_b T_p / T_b + T_p$  (2)

**3.1.5 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN O PARTÍCULA EMITIDOS POR EL RADIONUCLIDO INGERIDO:** Resulta muy importante el modo de decaimiento radiactivo del emisor interno, es decir, el tipo de rayos o partículas emitidas, su energía y su ionización específica (LET) ya que como se vió en el capítulo anterior, de esto dependerá su capacidad para producir daño biológico.

Radiaciones con mayor poder de penetración como las partículas beta y los rayos gama, causan irradiación y daño sobre una extensión mayor de tejido a partir del punto en que se localizan, a diferencia de las partículas alfa; sin embargo, la concentración de la ionización y el daño así como la EBR son relativamente mayores con radiaciones de alto LET.

La histopatología de radiación inducida por una dosis absorbida dada en cierto tejido, permaneciendo todas las demás condiciones igual, es similar para las radiaciones de bajo LET ya sea que su energía sea depositada en los tejidos a partir de fuentes de radiación dentro del cuerpo o fuera de él. Sin embargo, para ciertos tipos de radiación como los neutrones y las partículas alfa, su efectividad dentro del cuerpo es mayor que afuera debido a su mayor LET.(1)

3.1.6 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL RADIOACTIVO INGERIDO: La solubilidad, propiedades químicas y estado físico de las sustancias radiactivas juegan un papel importante en la cantidad de sustancia absorbida a partir del tracto gastrointestinal o el aire de los pulmones, o, especialmente en el caso de partículas insolubles, en la concentración selectiva de estas partículas en los sistemas de macrófagos o en el retículo del endotelio intestinal.(1)

La ingestión de radionúclidos en partículas insolubles, resulta en dosis de radiación depositadas a los tejidos del tracto gastrointestinal pues solo una pequeña fracción de la actividad ingerida entrará a la sangre con lo que la dosis total a otros tejidos del cuerpo se ve reducida; otros tejidos también son irradiados cuando los radionúclidos emiten radiaciones gama, pero para emisiones de partículas  $\alpha$  y  $\beta$  las dosis se confinan principalmente en el tracto gastrointestinal. La ingestión de formas más solubles provocará mayor absorción en la sangre y la deposición de radiación en otros tejidos que recibirán dosis mayores. En estos casos, la distribución de los radionúclidos en

los tejidos y su posterior excreción, dependerán ampliamente de la afinidad del elemento por los diversos sistemas de transporte y tejidos del cuerpo como se mencionó en 3.1.3.

De esta manera, la forma fisicoquímica del radionuclido determina también su distribución en el cuerpo pues la dosis al cuerpo entero depende principalmente de la cantidad de radionuclido que entra a la sangre. Por ejemplo, se ha visto que para el emisor  $\alpha$   $^{239}\text{Pu}$ , cuando está presente en los alimentos en complejos solubles, los niveles de absorción son superiores a 0.1% ( $10^{-3}$ ), pero para la ingestión de dióxido de plutonio insoluble la absorción intestinal será menor a  $10^{-5}$ . El plutonio se retiene principalmente en el esqueleto y el hígado con tiempos de vida media biológica de decenas de años; mientras menor sea la cantidad que se absorba a la sangre, menos cantidad de este radionuclido se depositará en los tejidos mencionados. (8)

La radiotoxicidad puede manifestarse mediante efectos agudos o crónicos. El interés central de la toxicología en alimentos de los radionúclidos recae en los efectos crónicos (2) ya que la radiación de fuentes internas es continua; esto distingue el riesgo asociado con la ingestión de emisores internos de aquél que involucra dosis únicas o fraccionadas provenientes de fuentes externas.

Con la irradiación crónica, los efectos máximos se producen más lentamente y a veces la recuperación de éstos es más lenta o menos completa que en irradiaciones agudas, especialmente en el caso de irradiaciones con alto LET. (1)

Para estimar esto, existe el factor de efectividad de razón de dosis (DREF, siglas en inglés de Dose Rate Effectiveness Factor) el cual mide la diferencia entre exposiciones agudas y crónicas o fraccionadas del mismo tipo de radiación a la misma dosis total.

El DREF es el cociente de dosis que producen el mismo efecto:  
DREF = cantidad de efecto X por exposición aguda / cantidad de  
efecto X por exposición crónica o continua

Se ha observado en algunos estudios experimentales de cáncer que para radiaciones de bajo LET (como las gamma), el DREF va de 2 a 10; es decir que la exposición continua o crónica es menos efectiva por un factor de entre 2 y 10. (9) Si esto es correcto, es una buena noticia pues la mayoría de las exposiciones ambientales y ocupacionales son debidas a radiaciones de bajo LET y son crónicas. (4) Por otro lado, para radiaciones con alto LET se ha visto que el valor DREF es menor a 1, con lo que el radón ambiental y la ingestión de radionúclidos emisores de partículas  $\alpha$  resultan en un alto riesgo de provocar cáncer. (9)

La dosis absorbida (D), en rad/ día, y la dosis acumulativa (CD), se obtienen por las siguientes ecuaciones:

$$D = 51.2 C_t E f$$

$$CD = 51.2 E f t C_t dt$$

en donde:  $C_t = C_0 e^{-0.693 t / T_e}$ , E = energía promedio de la partícula o radiación en MeV, f = fracción de energía emitida a un tejido en particular,  $T_e$  = vida media efectiva del radionúclido en el tejido de interés.  $C_t$  y  $C_0$  son las concentraciones del radionúclido al tiempo t y al tiempo cero respectivamente, y se expresan en mCi /g de tejido, con el tiempo expresado en días.

Nótese que la dosis en un tejido dado se encuentra relacionada con la dosis inicial ( $C_0$ ), la cantidad de energía emitida a los tejidos, el tiempo de vida media de retención y la masa del tejido. Por lo tanto manteniendo todos los factores constantes, a mayor longitud del tejido y menor tiempo de retención, menor será la cantidad de la dosis recibida por el tejido. (2)

## 3.2 EMISORES INTERNOS Y SUS FUENTES

Los emisores internos pueden ser de ocurrencia natural o producidos por el hombre; los últimos pueden provenir de tres fuentes: precipitación radiactiva de pruebas atmosféricas de aparatos nucleares, efluentes de reactores y derrames por accidentes en ellos o eventos similares, y guerras nucleares. Esto último no será considerado aquí.

### 3.2.1 EMISORES INTERNOS DE OCURRENCIA NATURAL:

Los significativos son el potasio-40, el radio-226 y el uranio-228; otros emisores internos que pueden contribuir a la dosis radiactiva total en la dieta son el carbono-14, el tritio, rubidio-87, radón-222, plomo-210 y el polonio-210. Muchos otros pueden ser ingeridos, pero debido a sus muy bajos niveles o lo corto de su vida media, no suelen ser considerados, aunque sus efectos combinados pueden ser significativos.

Potasio-40: El potasio natural es una mezcla de tres isótopos:  $^{39}\text{K}$  (93.08%),  $^{41}\text{K}$  (6.91%) y  $^{40}\text{K}$  que constituye el 0.0118% del potasio total, por lo que su concentración en cualquier producto puede ser estimada a partir del contenido de potasio total.

Prácticamente todos los alimentos contiene potasio; en un litro de leche hay aproximadamente 50 Bq de  $^{40}\text{K}$  y 200 Bq en un kilo de cacahuates.(18) En general, las frutas y vegetales contienen niveles de potasio mayores que otros productos alimenticios. En los Estados Unidos, la ingesta diaria por persona de potasio-40 se estima que es de 2 300 pCi ( $8.5 \times 10^7$  Bq).(2)

Un hombre adulto típico de 20 años y 70 Kg de peso contiene aproximadamente 140 g de potasio, con aproximadamente 3 700 Bq de  $^{40}\text{K}$  (10). La carga corporal de personas alrededor de los 20 años, suele ser 15% mayor que las de personas de menor edad. Las células de los músculos, cerebro y sangre contienen 0.3% de potasio y el suero sanguíneo 0.01%. No existe potasio en la grasa, por lo tanto,

el nivel de potasio en personas gordas es menor que el de las delgadas; también es menor en las mujeres que en los hombres, debido a la mayor masa muscular y menor tejido adiposo de los últimos.(2) La concentración de potasio en el cuerpo varía inversamente con la edad.(10)

El potasio-40 se encuentra distribuido por todo el cuerpo. Tiene un tiempo de vida media de  $1.3 \times 10^9$  años, y emite partículas beta, positrones y rayos gamma.(2)

Radio-226: El radionúclido radio-226 consigue entrar al cuerpo en su mayoría por la vía de los alimentos y en cierta medida por el agua que se bebe. En algunas áreas, la contribución a partir del agua puede ser alta; por ejemplo, en 1962 en Illinois se reportó que eran de 3 a 36 pCi/L en muestras de agua de manantiales y ríos.

El  $^{226}\text{R}$  tiene un tiempo de vida media de  $1.6 \times 10^3$  años, y emite partículas alfa, rayos gamma y electrones. Siendo un "buscador de huesos", se deposita en las células del endostelio y médula ósea.(2)

La experiencia que se tiene sobre sus efectos proviene principalmente del estudio de personas que ingirieron radio, mesotorio y radiotorio de pinturas luminosas de las carátulas de relojes mientras trabajaban pintándolos, o que recibieron sales de radio por procedimientos terapéuticos. Muchas padecieron osteosarcoma, algunas desarrollaron necrosis ósea y tumores. Aproximadamente el 30% de la dosis ingerida de radio se absorbe a través del tracto gastrointestinal.(1)

Uranio-238: La carga de  $^{238}\text{U}$  en el cuerpo, se deriva en su mayoría de la dieta y el agua que se bebe.

Tiene un tiempo de vida media de  $4.51 \times 10^9$  años (equivalente a la edad de la tierra) y emite partículas alfa. También es un "buscador de huesos" y se deposita en las células del endostelio y la médula ósea.(2) Sólo cantidades trazas de uranio se absorben del

tracto gastrointestinal o a través de la piel. El riñón es el principal sitio de daño tisular después de dosis pequeñas o moderadas de uranio. Este resulta mucho mas importante por su toxicidad química que por su radiactividad: sus efectos químicos son agudos y actúan sobre el epitelio tubular de las vías urinarias.(1)

Radon-222: emisor alfa con vida media física de 3.8 días. Este gas junto con el xenon-133, emisor beta con vida media de aproximadamente 7 días, son absorbidos y eliminados por los pulmones y el tracto gastrointestinal. Se distribuyen a través de los fluidos corporales y se concentran en la grasa. La inhalacion de altos niveles de radón y xenón resulta en lesiones difundidas, similares a las observadas en irradiación del cuerpo entero por fuentes externas pero con daño adicional al sistema respiratorio.(1) Existen evidencias de que exposiciones crónicas pueden causar daño de pulmón.(12, 13, 21) El problema de la inhalación de radón y polvo radiactivo es de particular importancia en la industria minera, donde esta exposición se ha asociado con alta incidencia de cáncer de pulmón.(1)

Plomo-210 y Polonio-210: Las cantidades de  $^{210}\text{Pb}$  y  $^{210}\text{Po}$  ingeridos en la dieta de Estados Unidos y otros países occidentales es de 1 a 10 pCi/día. Aquellas personas que consumen principalmente carne o pescado como los lapones o esquimales cuya dieta es a base de reno, pueden ingerir grandes cantidades de estos radionúclidos. Ambos radionúclidos son productos del decaimiento de las series del radón-222 y el uranio-238.

El plomo-210 tiene un tiempo de vida media de 19.4 años y emite partículas alfa y beta. También se dirige a los huesos.

El polonio-210 tiene una vida media de 138.4 días y emite partículas alfa y rayos gamma; es de alto riesgo radiológico ya que posee una elevada radiactividad con relación a cantidad de

sustancia química. Se excreta principalmente a través de los riñones y es retenido por el tejido blando, especialmente en tejido linfático, el bazo, riñón, hígado, médula ósea y gónadas. Cuando se ingiere también se encuentran altas concentraciones en los eritrocitos. A diferencia de lo que ocurre con los radionúclidos que se fijan en la zona mineral de los huesos, el polonio-210 se va excretando continuamente; se ha visto que en ratas 90% de el polonio absorbido se excreta 15 días después de la ingestión.(1)

Rubidio-87: No existen datos confiables que consideren los niveles de  $^{87}\text{Rb}$  en la dieta y el agua, pero se ha estimado que suministra una dosis por persona por año de 0.4 mrem para las células del endostelio, 0.6 mrem para el cuerpo entero y la médula ósea y 0.3 mrad para las gónadas. El rubidio-87 tiene un tiempo de vida media de  $4.3 \times 10^{10}$  años y emite partículas beta.

Carbono-14 y tritio: El  $^{14}\text{C}$  tiene un tiempo de vida media de 5760 años; el tritio de 12.3 años. Ambos emiten partículas beta.

Tanto los niveles de  $^{14}\text{C}$  como de tritio en la biosfera se han incrementado significativamente debido a las detonaciones nucleares. La proporción de tritio (átomos de tritio/ $10^6$  átomos de hidrógeno) en agua normalmente es de 5. Esta había aumentado constantemente a casi 3000 en 1963; actualmente este valor es probablemente menor a 100.(2)

### 3.2.2 EMISORES INTERNOS GENERADOS POR PRECIPITACIÓN RADIATIVA

Antes de 1945 no existían radionúclidos artificiales en el ambiente(19), pero a partir de este año, la detonación de más de 300 pruebas termonucleares por los Estados Unidos, la ex Unión Soviética, la República China y otros países, han producido una carga considerable de despojos radiactivos en la atmósfera. Estos desechos han resultado en una precipitación radiactiva muy amplia

sobre la superficie terrestre, particularmente en las latitudes templadas del hemisferio norte en el que la mayoría de la población humana habita. Con base en la localización de la mayoría de las detonaciones nucleares, se ha visto que la mayor precipitación ocurre aproximadamente en los 40-50 °N de latitud. Aunque una gran cantidad de elementos radiactivos fueron producidos durante las explosiones nucleares, la mayoría son relativamente pequeños en cantidad y tienen tiempos de vida media física muy cortos. Sin embargo, unos cuantos son producidos en relativamente grandes cantidades y tienen tiempos de vida media largos; estos radionúclidos presentan riesgos específicos a la salud como contaminantes de los alimentos y el agua. Algunos de los más importantes en términos de precipitación total y tiempos de vida media son: estroncio-90 ( $t_{0.5}=28$  años), estroncio 89 ( $t_{0.5}=51$  días), plutonio-239 ( $t_{0.5}=2.4 \times 10^4$  años), plutonio-240 ( $t_{0.5}=90$  años), cesio-137 ( $t_{0.5}=30$  años), y yodo-131 ( $t_{0.5}=8$  días).

Cesio-137: El  $^{137}\text{Cs}$  emite partículas beta y gamma y su persistencia en el ambiente se debe a que su tiempo de vida media física es de 30 años. Este radionúclido no se acumula en los huesos o algún otro tejido, por lo que su vida media biológica es de solo 105 a 140 días. (9,2) Es similar al potasio en su comportamiento metabólico y ambos se distribuyen en el músculo(19) aunque son independientes y no competitivos; por esto, a veces se emplea la relación  $\text{pCi}^{137}\text{Cs}/\text{gK}$  para estimaciones del contenido de éste radionúclido en el cuerpo, aunque el cesio no está necesariamente relacionado con el potasio, excepto por su distribución en los tejidos.

El cesio está estrechamente unido al suelo por lo que no entra fácilmente a la cadena alimenticia, no obstante, algo de cesio es liberado al forraje y entonces es ingerido e incorporado por las vacas lecheras, de esta manera el  $^{137}\text{Cs}$  se refleja en la leche(2); su presencia en este alimento es muy importante especialmente para

los infantes si consideramos que se alimentan principalmente de leche. Del  $^{137}\text{Cs}$  ingerido por los animales domésticos en el forraje, el 70% se deposita en sus músculos de donde lo ingerimos. También pasa a los huevos de las gallinas y es introducido a los productos agrícolas al absorberlo las plantas a través de la raíz y las hojas y transportarlo después a la parte comestible durante el periodo de maduración. El  $^{137}\text{Cs}$  se libera a los mares por los efluentes de reactores nucleares o por la precipitación radiactiva y la mayoría de los organismos acuáticos pueden acumularlo en sus tejidos musculares, especialmente los mariscos. (19)

La detección de este radionúclido en leche varios años después de las series de pruebas nucleares de 1962, indica la incorporación a las plantas del cesio-137 unido al suelo. Entre 1974 y 1976, antes de la prueba nuclear China, los niveles de cesio-137 en leche en los Estados Unidos, estuvieron entre 6 y 13 pCi/; los niveles de 1964 estuvieron entre 140 y 160 pCi/L. Como el cesio-137 no se deposita o acumula en tejidos específicos, se ha comprobado que su concentración en gónadas, huesos y médula ósea son los mismos.

Durante las detonaciones nucleares chinas en 1976 la concentración de  $^{137}\text{Cs}$  en leche de los Estados Unidos entre el 1 de Octubre y el 12 de Noviembre de 1976, estuvo entre 0 y 32 pCi/L, los valores más altos correspondieron a Tampa, Florida y fueron entre 21 y 32 pCi/L. Valores similares se reportaron para la segunda explosión en noviembre de 1976, siendo otra vez Tampa la de los valores más altos: 28 a 35 pCi/L. Sin embargo, las concentraciones integras más altas para muestras colectadas entre el 1 de octubre y el 12 de Noviembre de 1976 fueron las de Jackson, Mississippi con 200 pCi-día/L; esta concentración es equivalente a una dosis de 0.2 mrem para el hígado de un infante. (2)

El  $^{137}\text{Cs}$  ingerido con los alimentos se absorbe del tracto gastrointestinal y pasa a la sangre de donde se distribuye por todos los tejidos del cuerpo. La ingesta de este radionúclido puede aumentar el riesgo de contraer cáncer de pecho, de pulmón, de

tiroides o de huesos y leucemia aunque de acuerdo a las estimaciones de riesgo que se han realizado, este ha disminuido desde 1963 en que la intensidad en las pruebas nucleares también disminuyó, estimándose en 1990 en Japón, que el máximo riesgo fatal anual fue de aproximadamente una persona entre tres millones. (19)

Plutonio-238, Plutonio-239 y Plutonio-240: El  $^{238}\text{Pu}$  es un emisor alfa con tiempo de vida media de 50 años y tanto el  $^{239}\text{Pu}$  como el  $^{240}\text{Pu}$  son emisores alfa y gama con vida media de 24000 años el primero. Pueden distribuirse ampliamente en los alimentos, como se vió entre 1972 y 1974 en Estados Unidos en donde se detectaron en nivel mas alto en almejas (0.04 pCi/Kg), además de encontrarse en carne de res y cerdo, huevos, pescado, leche, productos de cereales, vegetales, fruta y agua. (2)

El  $^{239}\text{Pu}$  es un "buscador de huesos" que dentro del cuerpo es tan peligroso como el radio aunque sólo se absorbe el 0.0026% a través del tracto gastrointestinal; su absorción por los pulmones también es mínima. No se deposita en el componente mineral de los huesos sino en la matriz orgánica y la superficie ósea. El tejido blando donde más se concentra es el hígado. El plutonio puede provocar daño en huesos incluyendo necrosis y alta incidencia de osteosarcoma en fases tempranas después de su introducción causa daño y tumores en hígado.

Los elementos del grupo de los actínidos y las tierras raras tienen un comportamiento muy similar al plutonio. (1)

Yodo-131: Emite partículas beta y rayos gama. Debido a que su tiempo de vida media es muy corto (8 días), su presencia en los alimentos es significativa sólo pocos días o semanas después de una detonación nuclear o un derrame accidental de un reactor nuclear, pues menos del 1% de la cantidad original de  $^{131}\text{I}$  queda 60 días después de su liberación.

La leche y otros productos lácteos son la fuente principal de este radionúclido pues el  $^{131}\text{I}$  se deposita en las hierbas del forraje, excretándose después a la leche el 6% del yodo consumido por las vacas. (2)

El yodo se absorbe rápidamente del tracto gastrointestinal y tiene una alta afinidad por la glándula tiroides. Se han estudiado los efectos de su ingestión crónica en ovejas encontrándose que dosis orales de 40 mCi o más por día durante cuatro años producen inflamación crónica, necrosis y fibrosis de la glándula tiroides, retardo en el crecimiento y otras señales de hipotiroidismo y fallas para dar a luz a su descendencia. Animales que recibieron solo 5 mCi por día mostraron disminución del tamaño de la glándula y mala incorporación de yodo a esta. (1)

Estroncio-90: Es un emisor beta con vida media física de 28 años. (1) Es un "buscador de huesos" que ingresa al cuerpo principalmente a través de la dieta y el agua y se ha visto que puede contaminar todos los alimentos, aunque en la superficie de los vegetales se depositan los niveles más altos a diferencia de los tubérculos y raíces comestibles. La carga corporal de estroncio-90 y su concentración en los alimentos generalmente se relaciona con el contenido de calcio en forma de cociente ( $^{90}\text{Sr}$  en pCi/g Ca) ya que estos elementos están química y biológicamente relacionados. Este cociente normalmente se usa para expresar el nivel de estroncio-90 en alimentos y huesos y es llamado unidad de estroncio (SU por sus siglas en inglés); 1 SU = 1 pCi  $^{90}\text{Sr}$ /g calcio. (2)

Entre los productos de fisión liberados por explosiones nucleares y accidentes de reactores, el estroncio-90 es de gran importancia como un riesgo potencial a largo plazo ya que posee la peligrosa combinación de tener un alto rendimiento entre los productos de fisión, vidas medias físicas y biológicas largas, alto índice de absorción y elevado tiempo de residencia en los huesos.

Como su metabolismo es similar al del calcio, tiende a entrar a la fase mineral del hueso, especialmente cuando se está dando la mineralización de hueso nuevo o cartilago; por esto no se distribuye uniformemente en el hueso del adulto pero sí en el de los niños en crecimiento.

### 3.2.3 RADIONÚCLIDOS LIBERADOS DE REACTORES NUCLEARES

Numerosos reactores nucleares se han construido alrededor del mundo desde 1954, cuando el primer reactor de poder se construyó en los Estados Unidos. De ellos son liberadas pequeñas cantidades de radionúclidos al ambiente por medio de sus efluentes. Un control riguroso de la calidad radiactiva de esos efluentes ha asegurado que el escape de radionúclidos se mantenga en el mínimo posible y dentro de los límites de seguridad.

Sin embargo, una consideración mucho más seria es la posibilidad de liberación accidental de productos radiactivos debido al funcionamiento incorrecto de los reactores o a explosiones. Desafortunadamente, este temor se ha hecho realidad en muchas ocasiones desde octubre de 1954 cuando ocurrió un accidente en el reactor Windscale en la costa noroccidental de Inglaterra, seguido de otros como el del reactor Three Mile Island en Pennsylvania, USA, el 28 de marzo de 1979 y el de Chernobil en 1986 en la Ex-Union Sovietica.

Los radionuclidos que de esta manera pueden liberarse incluyen el yodo-131, cesio-137, estroncio-89 y estroncio-90. (2)

## 4 INSTRUMENTACIÓN PARA DETECCIÓN DE LA RADIATIVIDAD

Para detectar la presencia de radiactividad son necesarios instrumentos que respondan al paso de ella con alguna señal observable; para lograr esto, la radiación debe interactuar con la materia como se vio en el capítulo 1.(5) Los instrumentos para detectar la radiación nos proporcionan con variada eficiencia datos acerca del número de núcleos decayendo por unidad de tiempo en una muestra radiactiva y de la energía de las radiaciones absorbidas por el detector.

Cuando un detector es conectado y se aplica se voltaje de operación, empieza a registrar un número dado de cuantas por unidad de tiempo, aunque no tenga muestra radiactiva en posición de ser detectada; esto se debe a la radiación ambiental natural conocida como radiación de fondo, y en menor medida al ruido electrónico del detector mismo. Para cada medida de radiactividad, la radiación de fondo debe ser medida en las condiciones de operación escogidas y sustraída de las lecturas que representan la actividad de la muestra sumada a la radiación de fondo.(14)

Dependiendo del tipo de radiación que se trate, deberá emplearse un detector diferente pues cada radiación interactúa de manera distinta con la materia; además los niveles de radiación y las energías varían drásticamente.

### 4.1 DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN

Tres parámetros son empleados comúnmente para caracterizar los diferentes tipos de detectores:

4.1.1 LA EFICIENCIA (E): Se refiere al número de radiaciones detectadas con respecto al número emitido por la fuente. Existen dos maneras de definir la eficiencia, una basada en el número de

radiaciones emitidas por la fuente y otra basada en el número de radiaciones que llegan al detector. La primera se llama eficiencia absoluta y la segunda eficiencia intrínseca:

$$E_{abs} = \text{Número de pulsos registrados} / \text{Número de radiaciones emitidas por la fuente}$$

$$E_{int} = \text{Número de pulsos registrados} / \text{Número de radiaciones que llegan al detector}$$

En la mayoría de los casos se desea la mayor eficiencia posible. Para radiaciones no penetrantes como partículas pesadas cargadas, puede lograrse una eficiencia cercana al 100% con los detectores apropiados; para radiaciones penetrantes sin carga, las eficiencias generalmente son menores.

4.1.2 ENERGÍA DE RESOLUCIÓN (R): Se refiere a la capacidad del detector para discriminar entre dos radiaciones de diferentes energías. Para los detectores que no proporcionan información sobre energías, este parámetro no se considera. La resolución se define con referencia a la representación gráfica de el número de radiaciones detectadas contra la energía de la radiación, como se ve en la figura # 1:

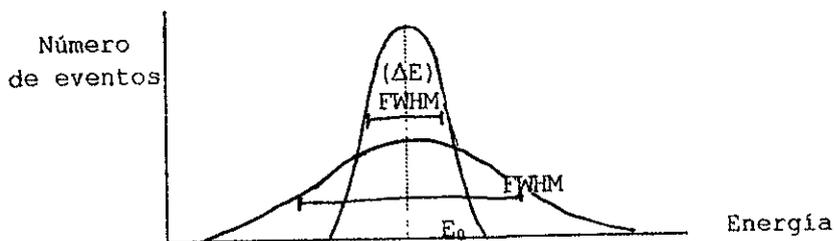


Fig #1

$$R = \Delta E / E_0$$

$E_0$  es la energía que corresponde al centro del pico y  $\Delta E$  se refiere al ancho del pico a la mitad entre la línea base y el máximo del pico; también se llama ancho a la altura media y se simboliza como FWHM, siglas en inglés de "Full Width at Half-

Maximum". La resolución usualmente se expresa como porcentaje; entre menor sea el valor, mejor capacidad del detector para separar dos radiaciones de energías similares. La resolución nunca es perfecta debido al ruido electrónico y la naturaleza estadística de las interacciones de la radiación con la materia y varía enormemente entre los diferentes detectores.

4.1.3 TIEMPO MUERTO DEL DETECTOR ( $\tau$ ): Se refiere a la cantidad de tiempo necesario para que el detector pueda recuperarse de una radiación recibida y pueda responder a la segunda. Se ve afectado por la naturaleza del detector y la electrónica asociada. Sistemas de detección muy rápidos son capaces de responder a un evento en cuestión de nanosegundos.

Los detectores de partículas y radiaciones ionizantes pueden clasificarse en tres grupos:

- Detectores en estado gaseoso
- Detectores de centelleo
- Detectores semiconductores en estado sólido

## 4.2 DETECTORES EN ESTADO GASEOSO

Todos los detectores de gas consisten en un volumen de gas encerrado o fluyendo continuamente en un contenedor. Un voltaje es aplicado a través de unos electrodos dentro del gas, creándose un campo eléctrico.

Conforme la radiación pasa a través de la cámara, ioniza el gas que la llena formando pares iónicos electrón-positrón. Al ser atraídos estos iones hacia los electrodos, se genera una señal eléctrica que indica el paso de la radiación. Esta señal puede ser medida como intensidad de corriente, un pulso de voltaje o carga total acumulada; la elección dependerá de como este configurado el instrumento. Posteriormente esta señal es amplificada por un sistema electrónico asociado al detector para que pueda ser medida y clasificada.

La energía perdida por la radiación incidente en la formación de un par iónico (llamado valor  $W$ ) en un gas es de aproximadamente 30-35 eV.

Existen tres tipos de detectores en estado gaseoso: las cámaras de ionización, los detectores proporcionales y los contadores Geiger-Muller. Difieren principalmente en la intensidad del campo eléctrico aplicado entre los electrodos; esta variación en voltaje ocasiona diferencias en los procesos de ionización que se dan dentro de la cámara y en el comportamiento de los iones producidos. La figura # 2 muestra la relación entre el voltaje aplicado y la señal de salida (pares iónicos colectados) en el contador de estado gaseoso:

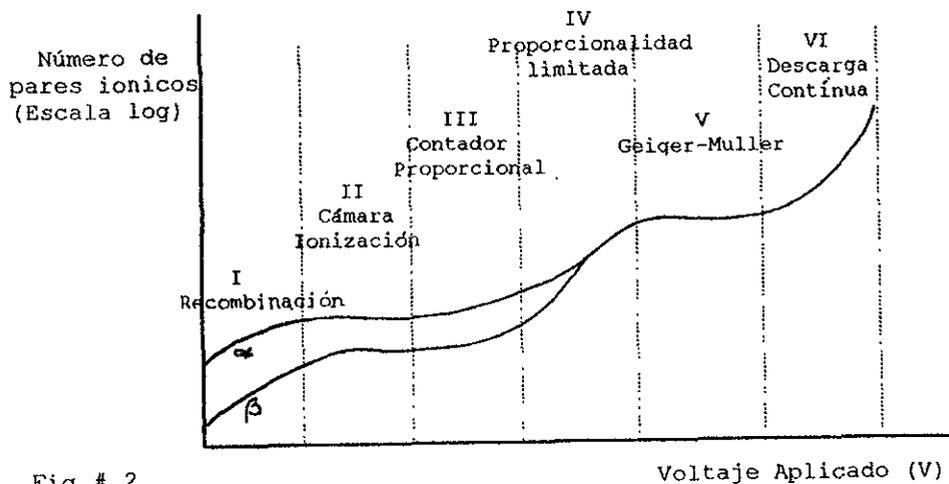


Fig # 2

En la región I llamada de recombinación, el voltaje es demasiado bajo como para que todos los pares iónicos formados por la radiación sean colectados, por lo que mucho de los iones simplemente se recombinan formando átomos neutros o moléculas de gas otra vez, sin llegar a los electrodos; esta región no es útil para detección.

En la región II el voltaje es suficientemente alto como para que virtualmente todos los iones formados por un evento de ionización sean colectados, pero no lo suficiente como para que los iones sean acelerados y causen ionizaciones secundarias, por lo tanto la amplitud de la señal obtenida depende sólo de la energía de la radiación incidente; en esta región operan las cámaras de ionización.

A mayores voltajes, en la región III, los electrones formados en el evento de ionización original son acelerados alrededor de los electrodos con energía cinética suficiente para inducir conforme migran eventos de ionización secundaria limitados; aunque la amplitud de la señal no es constante al variar el voltaje del detector, aún conserva la linealidad con la energía de la radiación incidente; esta es la región de operación de los contadores proporcionales.

Al aumentar el voltaje, en la región IV, la relación lineal entre la energía de la radiación y la señal de salida empieza a deteriorarse; esta región de proporcionalidad limitada no se emplea para detección. (5)

En la región V, el voltaje se ha elevado tanto que la carga acumulada en los electrodos es independiente del tipo de radiación o del número de iones inicialmente formados; la intensidad de campo rodeando al electrodo central es tan alta que cualquier ion formado, sea de origen primario o secundario, es acelerado lo suficiente para causar ionización adicional, dando lugar a una avalancha de iones por una reacción en cadena; esta es la región Geiger-Muller y en ella los pulsos de corriente obtenidos por unidad de tiempo no tienen una altura proporcional a la energía de radiación, pero son tan grandes que resultan mucho más sencillos de detectar en el equipo electrónico anexo que si provinieran de la región proporcional.

En la región VI los electrodos descargan de manera continua por lo que no es útil para la detección de la radiactividad. (14)

4.2.1 CÁMARAS DE IONIZACIÓN: Generalmente se utilizan para detectar partículas que producen una gran ionización específica como las  $\alpha$ . Son simples y seguros pero proporcionan pulsos de muy pequeño voltaje por lo que requieren de una gran amplificación externa para poder obtener cuentas por unidad de tiempo, usándose más bien la medida de la carga acumulada en los electrodos para determinar niveles de radiactividad, de manera que su utilización más frecuente es como dosímetros y monitores. (14) Como sólo se colectan iones producidos por ionización primaria, puede emplearse casi cualquier gas para llenar este detector. (5)

4.2.2 DETECTORES PROPORCIONALES: En estos el contenedor del gas es un cilindro que funciona como cátodo y contiene un delgado alambre central o una pequeña esfera que funciona como ánodo. (14) Como gases de llenado se emplean generalmente los gases nobles He, Ar y Xe acompañados de un agente atenuador, usualmente metano en un 10%. Presentan tiempos muertos muy cortos y son muy eficientes para detección de partículas de alcance corto como partículas pesadas cargadas y partículas  $\beta$  de baja energía; se emplean comúnmente para la detección de rayos X de baja energía, neutrones y fuentes mezcladas de partículas  $\alpha$  y  $\beta$ . Son poco eficientes para radiaciones penetrantes de alta energía como las rayos  $\gamma$ . (5)

4.2.3 CONTADORES GEIGER-MULLER: Este detector es similar al detector proporcional en su construcción y los requerimientos del gas de llenado. (23) También la naturaleza de los pulsos producidos es similar pero de una mayor amplitud pues las avalanchas iónicas generadas por la radiación y el voltaje aplicado son mayores, aunque los detectores Geiger-Muller están limitados a manejar menor número de cuentas por unidad de tiempo por tener un mayor tiempo muerto. (14) Usualmente se emplea como gas de llenado 97% de He y 3% del agente atenuador, usualmente una sustancia orgánica como isobutano. Por producir señales mayores requiere menos

amplificación externa pero no proporciona información sobre la energía o identidad de la radiación incidente por lo que se emplean para detectar niveles de actividad gruesos.(5) También se usan comúnmente para partículas  $\beta$ .(14)

#### 4.3 DETECTORES DE CENTELLEO

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 o molecular.(5) Los átomos o moléculas excitados, al desexcitarse emiten una fracción de la energía total absorbida en forma de un fotón de luz azul.(14) Esta luz pasa a través del material centelleante y después por un conducto de luz hasta un tubo fotomultiplicador (TFM) que convierte los destellos de luz en señales eléctricas. Entonces la señal es procesada electrónicamente para amplificarla y almacenarla.(5) El número de fotones producidos 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.(14)

Las sustancias capaces de absorber energía y emitirla en forma de fotones de luz son llamadas fósforos. Estos pueden ser de dos tipos:

4.3.1 FÓSFOROS INORGÁNICOS: Los mas empleados están hechos de Yoduro de Sodio con trazas de Talio -NaI(Tl)-. El Talio, también llamado activador, se añade al cristal de yoduro de sodio como impureza por dos razones: para facilitar la excitación atómica del fósforo y para reducir la energía del fotón emitido a niveles dentro del espectro visible o ultravioleta donde pueden ser fácilmente amplificados por el TFM.

Estos fósforos resultan muy adecuados para la detección de rayos  $\gamma$  y rayos X pues proporcionan buena eficiencia, rendimiento de luz mayor que cualquier otro fósforo 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 (en contraste con los detectores gaseosos) y contienen un elemento con alto número atómico, el yodo, que 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 de aproximadamente 230 ns, el cual es largo comparado con otros fósforos por lo que no es ideal para aplicaciones con intervalos de conteo altos o experimentos que requieren una respuesta rápida. Los cristales de NaI son muy higroscópicos por lo que deben estar siempre cubiertos por contenedores de metal sellados. (5)

Existen otros fósforos con las mismas aplicaciones que el de NaI como el de CsI(Tl), LiI(Eu) y CsF pero son mucho menos usados:

Otros materiales usados como detectores de centelleo son cristales que contienen B y Li empleados para detección de neutrones y pantallas cubiertas de ZnS(Ag) para detección de partículas cargadas pesadas.

**4.3.2 FÓSFOROS ORGÁNICOS:** La mayoría de las moléculas orgánicas usadas como detectores de centelleo poseen sistemas electrónicos  $\pi$ . Para estas moléculas, la emisión de luz ocurre como resultado de transiciones electrónicas dentro de las moléculas individuales por lo que la estructura cristalina no es importante, pudiendo ser líquidos o sólidos. Son empleados principalmente para conteo de partículas  $\alpha$  ó  $\beta$  porque la mayoría de las moléculas orgánicas están compuestas sólo por elementos de bajo número atómico. Ejemplos de fósforos orgánicos sólidos son el antraceno, estilbena y plásticos transparentes como poliestireno o polivinil tolueno con impurezas de para-terfenilo y tetrafenilbutadieno.

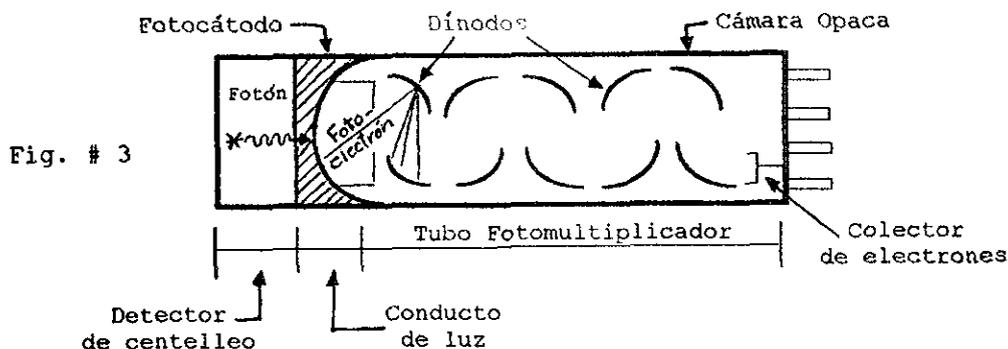
La detección mediante sistemas de centelleo líquido se usa ampliamente en estudios biológicos, médicos, bioquímicos y orgánicos pues este método es muy adecuado para la detección de emisores de partículas  $\beta$  de baja energía como las emitidas por  $^3\text{H}$  y  $^{14}\text{C}$ , trazadores muy empleados para moléculas orgánicas. La mezcla para centelleo líquido consiste en el fósforo como soluto en un 0.5% aproximadamente, un solvente y la muestra en disolución(5); la radiación excita las moléculas del solvente, el cual transfiere la energía de excitación a las moléculas del fósforo, emitiéndose entonces el centelleo de luz azul hacia el tubo o tubos fotomultiplicadores.(14)

4.3.3 EL TUBO FOTOMULTIPLICADOR (TFM): Su tarea consiste en transformar la luz originada por el fósforo en una señal electrónica.

El TFM está encerrado en un contenedor opaco porque la luz externa se debe excluir completamente para que el TFM responda sólo a los fotones de centelleo. El fotón producido por el fósforo pasa a través de un conducto de luz que sirve como conexión óptica entre el detector y el TFM. El fotocátodo es un material fotosensitivo fabricado frecuentemente de aleaciones Ag-Mg o Cs-Sb; al incidir el fotón sobre él se produce la emisión de electrones llamados fotoelectrones(5), el fotocátodo será capaz de producir aproximadamente 1 fotoelectrón por cada diez fotones emitidos por el fósforo.(14) Los fotoelectrones son atraídos hacia el ánodo pero antes de que lleguen a él encuentran una serie de dínodos cuya función es multiplicar el número de electrones que finalmente llegan al ánodo; por cada fotoelectrón pueden producirse de  $10^7$  a  $10^{10}$  electrones para un TFM típico. Estos electrones producen un pulso de corriente que después puede ampliarse con un amplificador colocado en la posición siguiente del sistema. El pulso producido sigue siendo proporcional al número de fotoelectrones originales el cual está controlado por la intensidad de la luz producida en la

interacción; a su vez la intensidad de la luz es proporcional a la energía de la radiación que causó el centelleo. (5)

La figura # 3 muestra la estructura básica del TFM acoplado a un cristal de centelleo:



#### 4.4 DETECTORES SEMICONDUCTORES EN ESTADO SÓLIDO

Los detectores semiconductores están hechos usualmente de Germanio o Silicio. Las estructuras cristalinas de estos elementos, con cuatro electrones de valencia, son muy homogéneas pues todos estos electrones son usados en la formación de enlaces químicos por lo que su capacidad de transportar corriente es muy reducida. Cuando la radiación incide sobre sus átomos, un electrón es excitado a un nivel energético superior dejando vacante un sitio en su nivel original; este par electron-hueco, es análogo al par iónico formado en los detectores de gas y puede migrar a través del cristal en respuesta a un campo eléctrico, produciendo una señal eléctrica que marca el paso de la radiación.

Este es el principio de operación de los cristales semiconductores completamente puros, sin embargo, en la realidad los materiales semiconductores contienen varias impurezas que tienen un gran efecto en sus propiedades eléctricas. (5)

Si se introduce como impureza átomos como el fósforo, con cinco electrones de valencia, 4 de estos electrones serán usados para formar enlaces químicos, quedando un electrón en exceso; estos cristales son llamados tipo N y el fósforo se conoce como donante. Si se introducen átomos de boro con tres electrones de valencia, quedara un hueco en cada lugar donde falta un electrón, teniéndose un cristal tipo P donde el boro es el receptor, debido a su capacidad de recibir electrones. Si un material del tipo P se pone en contacto con uno tipo N, en la zona de unión los electrones que sobran del donante ocuparán los sitios vacíos del receptor, creando una estructura homogénea no conductora; aplicando un voltaje externo a través de esta zona se incrementa el espesor de la capa no conductora, formándose en ella el par electron-hueco al ser atravesada por la radiación ionizante. Los electrones liberados emigran de inmediato al polo positivo en donde se recolectan y forman pulsos o señales electrónicas que pueden ser contadas y clasificadas según su tamaño por el equipo adicional.

Como donadores pueden emplearse también Litio y Arsénico, y como receptor oro. Actualmente son muy empleados los de Ge-Li o Si-Li que requieren un crióstato que los mantenga a bajas temperaturas para que mantengan su propiedad semiconductor. Los detectores semiconductores presentan un tiempo muerto muy corto, gran resolución y el tamaño de los pulsos producidos es proporcional a la energía depositada en la capa de unión, sin importar la masa o carga de la radiación, lo cual no sucede con otros detectores. (14)

En la detección de rayos gama ofrecen alta resolución en energías, lo cual no es posible con los detectores gaseosos y de centelleo, (5) sin embargo, debido al volumen relativamente reducido de la zona de detección, aún cuando el material sea mas denso que el NaI(Tl), la eficiencia resulta menor. (14) Son también muy

empleados para la detección y análisis de energía de partículas alfa.

En años recientes ha sido posible producir Germanio con pureza suficiente como para presentar las propiedades de un material semiconductor puro. Estos son llamados detectores de Germanio Hiperpuro (HPGe) o detectores intrínsecos de Germanio. Su gran ventaja es que pueden almacenarse a temperatura ambiente aunque deben seguirse enfriando a temperaturas de nitrógeno líquido para su operación. Los detectores de HPGe tienen una eficiencia y resolución similares a los de Ge(Li) pero a veces son mejores, por ejemplo, existen detectores con eficiencias intrínsecas de hasta 100%; sin embargo, son más caros.(5)

#### 4.5 OTROS COMPONENTES DE LOS SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE DETECCIÓN

Todos los detectores descritos previamente requieren otros componentes:

4.5.1 ABASTECEDOR DE VOLTAJE: Este es un componente esencial del sistema de conteo ya que todos los detectores requieren la aplicación de un voltaje, cuya intensidad dependerá del detector a emplear.(5) El criterio general para determinar el voltaje de operación en detectores que no son Geiger-Muller, es escoger aquel voltaje para el cual la diferencia entre las cuentas debidas a la actividad de la muestra y a la radiación de fondo sea mayor. En detectores de centelleo, es necesario trazar una gráfica de los valores de voltaje contra el cuadrado de la diferencia de las lecturas para la muestra radiactiva y el fondo, dividido entre el fondo. El máximo de la curva obtenida indica el voltaje de operación. Generalmente esta información es proporcionada por el fabricante del equipo.(14)

4.5.2 PREAMPLIFICADOR: Para sistemas que generan pulsos de pequeña amplitud. Este dispositivo debe colocarse muy cerca del detector para impedir pérdida de señales o interferencias. Sirve para maximizar el cociente señal/ruido del detector y para proveer una amplificación preliminar de la pequeña señal del detector.

4.5.3 AMPLIFICADOR: Recibe el pulso del preamplificador y aumenta aún más la señal. Da forma a la señal para el posterior procesado y almacenado de esta por los demás componentes. La altura o amplitud del pulso que proviene del amplificador está relacionada con la energía de la radiación que produjo el pulso.

4.5.4 DISCRIMINADOR: Es un circuito electrónico que puede colocarse de tal manera que acepte pulsos por encima o por debajo de ciertas amplitudes preseleccionadas, ya que si radiaciones de más de una energía llegan al detector, se producirán pulsos de diferentes amplitudes, y si solo se requiere contar la radiación de una energía particular, deben seleccionarse los pulsos que corresponden a esa energía mediante el discriminador. Un discriminador de nivel inferior (DNI) establece el limite de menor amplitud y un discriminador de nivel superior (DNS) establece el de mayor amplitud. Esto puede ilustrarse con la figura # 4:

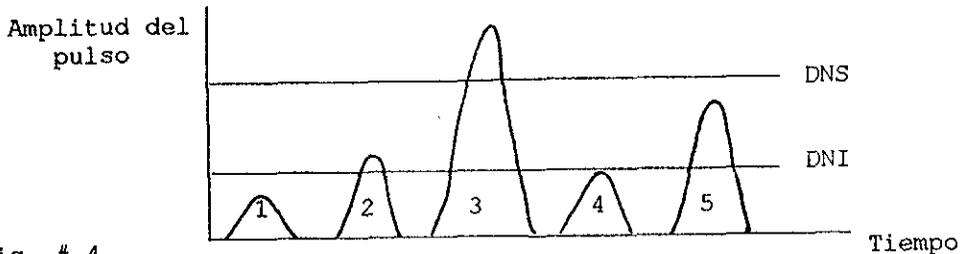


Fig. # 4

Sólo los pulsos 2 y 5 pueden ser aceptados por el sistema pues caen dentro de los límites establecidos por el DNI y DNS. Un

instrumento de discriminación simple que permite que se fijen los DNI y DNS es conocido como Analizador Monocanal;(5) éste puede estar conectado a un escalador (instrumento que cuenta las señales, llamado también contador) que va archivando las señales que por su altura pueden pasar por una ventana de ancho fijado por los discriminadores y que puede ser corrida a lo largo de varias alturas, detectando así diferentes alturas de pulsos y por lo tanto diferentes energías, obteniéndose distintos umbrales de detección del instrumento.(14)

Para obtener datos de todas las radiaciones de diferentes energías emitidas por una fuente es necesaria una clasificación de los pulsos de acuerdo a su amplitud (y por lo tanto a su energía) conforme se obtienen del detector, así como archivar el número de cada pulso de amplitud diferente que se recibe. Esto se logra con un convertidor análogo digital que toma señales semejantes del amplificador y las convierte en datos digitales que se almacenan en un analizador multicanal. Cada pulso recibido se coloca en su canal correspondiente (un lugar de almacenamiento en la memoria de la computadora) que corresponde a un rango de energías de radiaciones incidentes y se va contando el número de eventos en cada canal. La información procesada por el analizador multicanal se despliega gráficamente en una terminal de computadora; el eje horizontal de la gráfica proporciona el número de canal o energía equivalente de la radiación, y el eje vertical el número de pulsos o cuentas recibidos. La mayoría de sistemas de espectroscopía modernos están completamente controlados por computadora y el espectro del analizador multicanal puede guardarse en la computadora para después procesarlo o modificarlo.(5)

La figura # 5 muestra un esquema general de las partes de un sistema de detección y conteo de radiactividad:

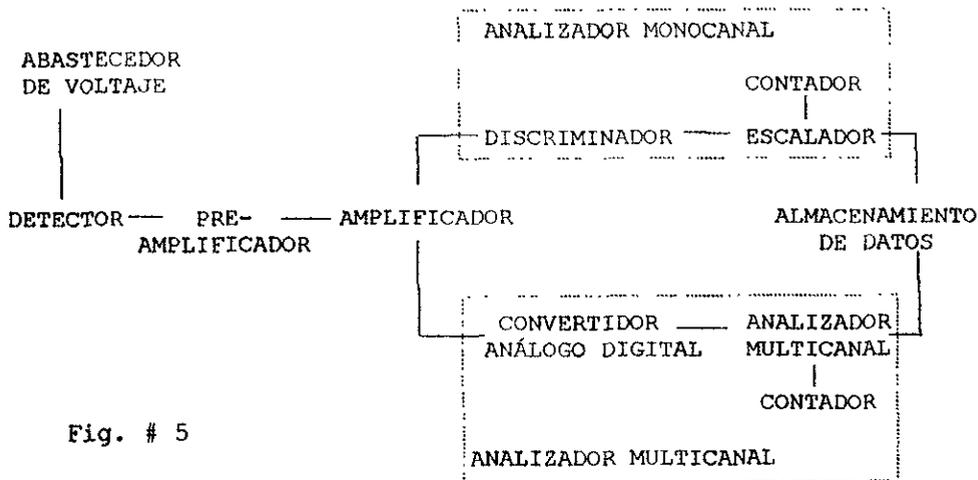


Fig. # 5

#### 4.6 PREPARACIÓN DE MUESTRAS RADIATIVAS:

La forma física de la muestra radiactiva puede ser un factor para decidir si se emplea un detector útil para fuentes sólidas, líquidas o gaseosas; sin embargo, las energías comprendidas en la detección y el tipo de partícula o radiación son mucho más importantes, por lo que en muchas ocasiones se requiere de una adecuación de la muestra para el equipo que se empleará. Para tener una idea del tipo de equipo a usar, se necesita información tan detallada como sea posible sobre la naturaleza de la radiación y los niveles de radiactividad a detectar. En muchos casos resulta posible escoger entre dos o más tipos de detectores, decidiendo el uso de uno de ellos debido a su eficiencia, facilidad de manejo, precio o disponibilidad.

Para el análisis de muestras sólidas, con excepción de los emisores  $\gamma$ , debe minimizarse la cantidad de sólidos en la muestra; esto se logra solubilizando una pequeña cantidad de muestra radiactiva y evaporando después un volumen de 0.5 ml o menos directamente sobre un pequeño disco metálico u otro contenedor plano. La evaporación se realiza bajo una lámpara de rayos

infrarrojos para evitar que salpique; una vez seca puede cubrirse con una película de plástico para evitar contaminaciones, a menos que se trate de emisores de partículas  $\alpha$  o  $\beta$  débiles que podrían absorberse en esta pequeña capa de materia.

Cuando el espesor de una muestra radiactiva emisora de partículas  $\alpha$  o  $\beta$  es incrementado, la actividad crece hasta un máximo en que permanece constante; este se alcanza cuando las partículas de las capas interiores son todas absorbidas antes de llegar a la superficie (autoabsorción). Este espesor es conocido como espesor infinito. Si se trata de emisores  $\alpha$  o  $\beta$  de baja energía, la fuente radiactiva debe ser extremadamente delgada para eliminar errores en la detección debidos a la autoabsorción. También puede darse absorción de las radiaciones por la materia existente entre la fuente y el detector, por lo que debe considerarse la absorción por el aire y la ventana del detector, o por la pared del contenedor de la muestra.

En el caso de la detección de rayos  $\gamma$  no existe este problema ya que tienen un alto poder de penetración. Muestras sólidas o líquidas que contengan un emisor  $\gamma$  pueden analizarse sin tratamientos previos. Los detectores de centelleo de NaI(Tl) son los más utilizados; el tamaño del cristal es proporcional a su eficiencia, aunque mientras más grande sea aumente la radiación de fondo detectada, inconveniente que puede resolverse en parte mediante blindaje. También puede aumentarse la eficiencia si los cristales detectores son del modelo tipo pozo, donde la muestra es introducida de manera que el fósforo la rodea. Cuando se trata de detectar emisiones  $\gamma$  a muy bajas actividades, como en el caso de alimentos, son utilizados recipientes de plástico con un espacio cilíndrico en el centro dentro del que se introduce un detector relativamente grande de 3 x 3 pulgadas; este recipiente se llama vaso Marinelli y puede contener volúmenes grandes de muestra, como 500 ml.

Cuando se utilizan sistemas de analizador multicanal es común que estén acoplados a detectores semiconductores debido a la mayor resolución de estos. (14)

#### 1.7 INTERPRETACIÓN ESTADÍSTICA DE RESULTADOS

Dado que el decaimiento radiactivo es un proceso al azar, sólo puede ser precisado en términos de probabilidad, por lo tanto, el número de desintegraciones con mayor probabilidad de ocurrir en un tiempo dado se establece de acuerdo a reglas estadísticas, habiendo siempre un margen de error o desviación con respecto al valor más probable. Es decir que en toda medición radiactiva no obtenemos un número de cuentas exacto e invariable en iguales periodos de tiempo, sino que sólo es posible una rapidez de cuentas promedio, que es un reflejo adecuado del nivel de radiactividad medido. Así, se emplea la estadística para la estimación de errores debidos a la naturaleza al azar del decaimiento radiactivo, proporcionando al mismo tiempo los medios de reducirlos al mínimo.

Si una muestra radiactiva es contada en alguno de los instrumentos por una hora, y el número de cuentas registrado se divide entre 60, tendremos el resultado en cuentas por minuto, el cual es el promedio de valores obtenidos 60 veces en 1 minuto de desintegración. Este resultado es más probable que corresponda al número de desintegraciones en un minuto dado que si hubiéramos tomado las cuentas sólo en un minuto en particular. Para que las cuentas por unidad de tiempo sean un promedio seguro y bien establecido, es necesario obtenerlas durante el periodo 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 disminuirémos la variación estadística y la desviación estándar de nuestros resultados.

Realizando un gran número de mediciones radiactivas por minuto en una misma muestra y agrupando éstas dentro de intervalos de valores pequeños, puede trazarse una gráfica de estos intervalos

contra el número de lecturas que ha caído dentro de ellos, 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.(14) Así, comúnmente se utilizan las leyes de distribución normal conocidas también como de Gauss, en donde la incertidumbre comúnmente se expresa como varianza ( $\sigma^2$ ) o desviación estándar ( $\sigma$ ) que es la raíz cuadrada de la varianza. En este caso la desviación estándar se calcula:  $\sigma = (\bar{X})^{1/2}$ . En la distribución de Gauss, 68.3% de las mediciones caerán en el intervalo  $\pm 1 \sigma$  del valor promedio (que es nuestra mejor estimación del conteo real), y el 95.5% caerán en  $\pm 2 \sigma$ .(5)

En muchos análisis radiactivos son importantes los cálculos de sensibilidad. L.A. Currie,(3) ha presentado una revisión excelente de los problemas estadísticos asociados con determinaciones cualitativas y cuantitativas de radiactividad. Describe tres niveles de calidad específicos para una medición:

1.- Límite de decisión ( $L_c$ ): es la respuesta neta del instrumento sobre la cual una señal observada en el detector puede ser reconocida con confianza. Por encima de él tendremos la seguridad de estar detectando la radiactividad de una muestra y no el ruido de fondo. Se emplea para una detección puramente cualitativa. Se calcula:  $L_c = 2.33 (F)^{1/2}$ , en donde F son las cuantas debidas al ruido de fondo.

2.- Límite de detección ( $L_D$ ): es el nivel de señal neto y real que se espera que a priori permita la detección. Señales por encima de él podrán emplearse para una determinación cuantitativa, pero se estará trabajando con un error mayor al 10%. Se calcula:  $L_D = 2.71 + 4.65 (F)^{1/2}$ .

3.- Límite de determinación ( $L_Q$ ): es el nivel al cual existe la precisión adecuada para una determinación cuantitativa con un error menor al 10 %. Se obtiene:  $L_Q = 14.1 (F)^{1/2}$ .(3)

## 5 DESARROLLO EXPERIMENTAL (MÉTODOS, RESULTADOS Y DISCUSIÓN)

Después de lo expuesto en capítulos anteriores, puede notarse la importancia de la detección y cuantificación de radionúclidos en alimentos, especialmente en lo que respecta a los contaminantes. A continuación se presenta el trabajo experimental realizado, conjuntando en este capítulo los métodos, instrumentos y materiales empleados, los resultados obtenidos y la discusión de ellos con el fin de hacer esta sección mas clara y explicativa.

En el presente estudio se analizaron dos radioisótopos: el  $^{137}\text{Cs}$ , que es un contaminante, y el  $^{40}\text{K}$ , que es un radionúclido de ocurrencia natural. Se compararon las actividades de ambos, entre ellos y contra la Norma Oficial Mexicana, así como la eficiencia, resolución y utilidad de dos equipos diferentes para el análisis de radiactividad en alimentos.

### 5.1 DETECCIÓN DE LAS RADIACIONES EMITIDAS POR EL $^{40}\text{K}$ PRESENTE EN KCl Y CÁLCULO DE SU TIEMPO DE VIDA MEDIA

El isótopo radiactivo natural del potasio, el potasio-40, se encuentra en una proporción del 0.0118% del potasio elemental; es decir que por cada 100 átomos de potasio elemental existirán 0.0118 átomos de potasio radiactivo. Por ser esta proporción tan pequeña, las radiaciones emitidas por el  $^{40}\text{K}$  son tan escasas que al contarlas podrían confundirse con la radiación de fondo; por esto, es necesario obtener el mayor número de lecturas posibles durante periodos largos de tiempo para disminuir las variaciones estadísticas inherentes al decaimiento radiactivo y al posible ruido del equipo.

El 10.7 % del  $^{40}\text{K}$  ( $Z = 19$ ) captura un electrón decayendo a  $^{40}\text{Ar}$  ( $Z = 18$ ) y emitiendo un rayo X con energía característica de 1460.8 KeV. Es este rayo X el que debe ser detectado por nuestro sistema;

a partir de esta detección se calculara el tiempo de vida media y la actividad del  $^{40}\text{K}$ .

#### 5.1.1 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN

Para la medición de la actividad del  $^{40}\text{K}$  se empleó un detector de centelleo de  $\text{NaI(Tl)}$  con diseño tipo pozo, acoplado a un analizador monocanal Miniscaler Eberline Ms-2.

El voltaje óptimo de operación de este instrumento es de 1.9 Volts.

##### 5.1.1.1 CALIBRACIÓN EN ENERGÍA (Energía contra umbral de detección)

Dado que se trabajó con un analizador monocanal, fue necesario mover los discriminadores de nivel superior y nivel inferior a lo largo de varias alturas, para obtener los umbrales en los que se podría detectar cada energía distinta correspondiente a cada uno de los radionúclidos analizados.

Para determinar los umbrales de detección, se calibra el instrumento empleando como estándar diferentes radionúclidos comerciales que emiten rayos  $\gamma$  de distintas energías y que poseen actividades bien definidas. Primero se coloca el radionúclido estándar a analizar en el detector y se registran las cuentas por unidad de tiempo conforme se mueve el umbral; aquél umbral en el que se registre el mayor número de cuentas es el correcto para detectar la energía de las radiaciones emitidas por el radionúclido analizado. Lo mismo se realiza con todos los radionúclidos a usar como estándar. Los resultados obtenidos se presentan en tabla # 1.

El umbral depende de la energía del radionúclido, pues entre mayor sea ésta, la amplitud de los pulsos de corriente que lleguen al discriminador será también mayor y el umbral deberá fijarse de

manera tal que estos pulsos puedan pasar al contador para que los archive.

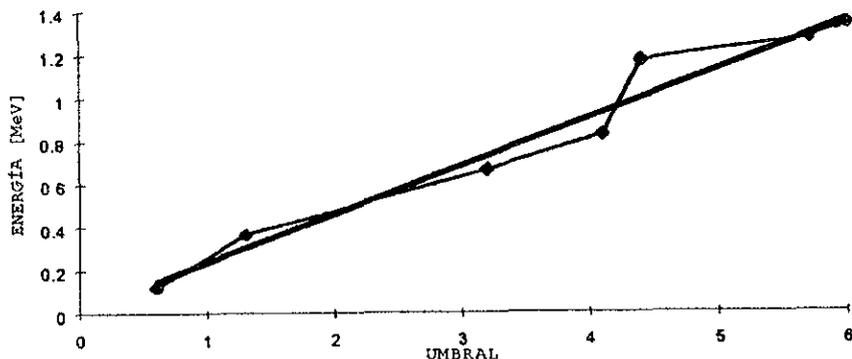
En un detector de centelleo como el empleado, el tamaño de los pulsos producidos es directamente proporcional a la energía de la radiación que originalmente incide en el detector. Gracias a esto es posible conocer el umbral adecuado de detección para cualquier radionúclido, a partir de la energía característica de la radiación que emite, si realizamos una gráfica de energía contra umbral empleando como datos los resultados presentados en la tabla # 1. La gráfica es la # 1.

Tabla # 1. Umbrales de detección para distintos radionúclidos en el analizador monocanal.

| RADIONÚCLIDO      | ENERGÍA DE LA RADIACIÓN EMITIDA [MeV] | UMBRAL ADECUADO DE DETECCIÓN |
|-------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| <sup>57</sup> Co  | 0.12                                  | 0.6                          |
| <sup>131</sup> I  | 0.365                                 | 1.3                          |
| <sup>137</sup> Cs | 0.662                                 | 3.2                          |
| <sup>54</sup> Mn  | 0.83                                  | 4.1                          |
| <sup>60</sup> Co  | 1.17                                  | 4.4                          |
| <sup>22</sup> Na  | 1.275                                 | 5.7                          |
| <sup>60</sup> Co  | 1.34                                  | 6.0                          |

Gráfica # 1

UMBRAL ADECUADO DE DETECCIÓN SEGÚN LA ENERGÍA DEL RADIONÚCLIDO



La ecuación de la recta obtenida en la gráfica # 1 es:  
 $y = 0.2234X + 0.0158$ , con un coeficiente de variabilidad  $R^2 = 0.9628$ .

Despejando "X" (umbral) de la ecuación anterior y sustituyendo en "y" el valor de energía emitida por el radionuclido que vamos a analizar (potasio-40) se obtiene el umbral adecuado de detección del instrumento:

$$X \text{ (umbral)} = (1.46 \text{ MeV} - 0.0158) / 0.2234 = 6.46$$

De aquí que el umbral debe fijarse en 6.4 si queremos detectar los rayos X emitidos por el  $^{40}\text{K}$ .

El umbral puede obtenerse también directamente de la gráfica # 1, al extrapolar o interpolar en la recta el valor de energía del radioisótopo (extrapolando 1.46 MeV para  $^{40}\text{K}$ ).

#### 5.1.1.2 CALIBRACIÓN EN EFICIENCIA (Eficiencia contra energía)

El sistema presenta diferentes eficiencias en la detección de radiaciones electromagnéticas dependiendo de la energía de estas, pues las radiaciones de menor energía tienen mayor probabilidad de disipar ésta en el material (en este caso el detector), obteniéndose mejores eficiencias en la detección que para radiaciones de mayor energía.

Por lo anterior es necesario calibrar el sistema en eficiencia; para esto se emplearon como estándar tres de los radioisótopos comerciales:  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ . Las características de cada uno se muestran en la tabla # 2.

La calibración se realiza colocando cada radioisótopo en el sistema de conteo, fijando el umbral de detección en aquél que previamente se determinó que era el correcto para la energía del radionuclido, y registrando sus cuentas durante un minuto; antes de cada determinación se obtienen las cuentas debidas a la radiactividad de fondo (encendiendo el sistema sin muestra durante 1 minuto) que posteriormente serán descontadas de aquellas obtenidas con el radioisótopo. Los resultados del conteo por minuto para cada

radionúclido y su respectivo conteo de fondo, así como la eficiencia del sistema en cada caso se presentan en la tabla # 3.

Tabla # 2. Características de los radionúclidos usados como estándar.

| RADIOISÓTOPO  | <sup>22</sup> Na | <sup>60</sup> Co | <sup>137</sup> Cs |
|---|------------------|------------------|-------------------|
| ACTIVIDAD ORIGINAL<br>(1-XII-85) [μCi]                      | 11.57            | 11.37            | 11.85             |
| ACTIVIDAD ORIGINAL<br>(1-XII-85) [dpm]                      | 25 685 400       | 25 241 400       | 26 307 000        |
| t <sub>1/2</sub> [años]                                     | 2.62             | 5.253            | 30                |
| FACTOR DE DECAIMIENTO                                       | 0.0446           | 0.213            | 0.762             |
| ACTIVIDAD AL MOMENTO DE<br>DETERMINACIÓN (4-IX-97)<br>[dpm] | 1 145 568.84     | 5 376 418.2      | 17 039 043.9      |
| ENERGÍA [MeV]   | 1.275            | 1.17             | 0.662             |
| UMBRAL ADECUADO DE<br>DETECCIÓN                             | 5.7              | 4.4              | 3.2               |

El factor de decaimiento (FD) se calculó con la siguiente formula:

$$FD = e^{- (0.693 / t_{1/2}) \times t}$$

en donde: t<sub>1/2</sub> = tiempo de vida media del radioisótopo y t = tiempo transcurrido desde la fecha en que se tenía la actividad original (1-XII-85) hasta la fecha de determinación (4-IX-97), en este caso 11.75 años. Usando el <sup>22</sup>Na como ejemplo:

$$FD = e^{- (0.693/2.62) \times 11.75} = e^{- (0.2645 \times 11.75)} = e^{- 3.1079} = 0.0446$$

La actividad al momento de la determinación se calculó multiplicando la actividad original en dpm por el factor de decaimiento del radioisótopo:

$$\text{Act. 4-IX-97 [dpm]} = \text{FD} \times \text{Act. 1-XII-85 [dpm]}$$

Empleando el  $^{22}\text{Na}$  como ejemplo:

$$\text{Act. 4-IX-97} = 0.0446 \times 25\ 685\ 400\ \text{dpm} = 1\ 145\ 568.84\ \text{dpm}$$

En el caso del  $^{137}\text{Cs}$ , sólo 85% de los núcleos decaen emitiendo rayos  $\gamma$ , por lo que solo el 85% de la actividad calculada sería detectada por nuestro sistema, lo cual se considera en el cálculo:

$$\begin{aligned} \text{Act. 4-IX-97 [dpm]} &= \text{FD} \times \text{Act. 1-XII-85 [dpm]} \times 0.85 \\ &= 0.762 \times 26\ 307\ 000\ \text{dpm} \times 0.85 \\ &= 17\ 039\ 043.9\ \text{dpm} \end{aligned}$$

Tabla # 3. Resultados de la calibración en eficiencia del analizador monocanal.

| RADIONUCLIDO   | $^{22}\text{Na}$ | $^{60}\text{Co}$ | $^{137}\text{Cs}$ |
|--|------------------|------------------|-------------------|
| CONTEO DE FONDO (F)<br>[cpm*]  | 92               | 98               | 155               |
| CONTEO CON EL ESTÁNDAR (C)<br>[cpm]                                  | 18 043           | 98 911           | 410 472           |
| CONTEO CORRESPONDIENTE A<br>LA ACTIVIDAD DEL ESTÁNDAR<br>(C-F) [cpm] | 17 951           | 98 813           | 410 317           |
| EFICIENCIA ABSOLUTA EN LA<br>DETECCIÓN [cpm/dpm]                     | 0.0156           | 0.0183           | 0.0240            |
| % DE EFICIENCIA ABSOLUTA   | 1.56             | 1.83             | 2.40              |

\* cpm = cuentas por minuto

La eficiencia absoluta es la relación del conteo neto obtenido (C-F) y de las desintegraciones reales sufridas por el radionúclido (Act. al momento de la determinación):

$$E_{\text{abs}} = \text{C-F [cpm]} / \text{Act.4-IX-97 [dpm]}$$

El porcentaje de eficiencia absoluta se obtiene:  $E_{\text{abs}} \times 100$

Por ejemplo, para el  $^{22}\text{Na}$ :

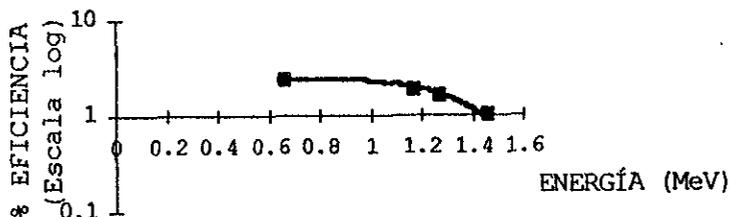
$$E_{\text{abs}} = 17\ 951\ \text{cpm} / 1\ 145\ 568.84\ \text{dpm} = 0.0156\ \text{cpm/dpm}$$

$$\% E_{\text{abs}} = 0.0156 \times 100 = 1.56\ \%$$

Para conocer la eficiencia absoluta que obtendríamos en la detección de  $^{40}\text{K}$  (o la de cualquier otro radioisótopo cuya energía de radiación conozcamos), se grafican los valores de energía de cada radionúclido usado como estándar en función de su eficiencia correspondiente y se extrapola el valor de la energía del rayo X emitido en el decaimiento del  $^{40}\text{K}$ , obteniéndose así la eficiencia para este radioisotópo. La gráfica de calibración es la # 2.

Gráfica # 2

CALIBRACIÓN EN EFICIENCIA  
DEL ANALIZADOR MONOCANAL



De la interpolación en la gráfica # 2 tenemos que la eficiencia del sistema de detección para rayos X de 1.46 MeV de energía emitidos cuando el  $^{40}\text{K}$  sufre captura electrónica y decae a  $^{40}\text{Ar}$  es de 1% exactamente.

5.1.2 DETECCIÓN DE LA RADIOACTIVIDAD DEL  $^{40}\text{K}$  Y CÁLCULO DE SU VIDA MEDIA

Para calcular la actividad del  $^{40}\text{K}$  contenido en el cloruro de potasio se fijaron las condiciones del sistema de operación en Voltaje=1.9 V, ventana=0.5, umbral=6.4 y tiempo detección=50 min. Durante 50 minutos se acumularon las cuentas debidas a la radiación de fondo y al ruido electrónico del equipo, obteniéndose así el

conteo de F en cp50m (cuentas por 50 minutos). Después se colocó un tubo de ensayo tapado conteniendo 10 g de KCl en el pozo del detector para obtener al fin de 50 minutos las cuentas debidas al fondo y a las radiaciones emitidas por el  $^{40}\text{K}$  (C) en cp50m. Esto mismo se repitió en 15 ocasiones, acumulando así 750 minutos de detección en total.

Para comprobar que efectivamente las cuentas observadas en la pantalla del registrador correspondían a la radiación del  $^{40}\text{K}$  contenido en los 10 g de KCl y no al ruido de fondo, se calculó el nivel de calidad en la medición con la fórmula:  $L_c = 2.33 (F)^{1/2}$  (3). En aquellas determinaciones en que  $C-F > 2.33 (F)^{1/2}$ , podemos tener la certeza de haber detectado la radiación debida al  $^{40}\text{K}$  y servirán para una determinación puramente cualitativa, es decir: en el KCl existe radiactividad debida a  $^{40}\text{K}$ .

Sin embargo, para calcular la vida media del  $^{40}\text{K}$  con un error de  $\pm 10\%$ , requerimos que  $C-F > 2.71 + 4.65 (F)^{1/2}$ . Se tendrá un error menor al 10% en la determinación si  $C-F > 14.1 (F)^{1/2}$  (3).

Los resultados obtenidos en las 15 determinaciones se muestran en la tabla # 4.

Tabla # 4. Resultados del conteo de actividad de  $^{40}\text{K}$  en  $\text{KCl}$ .

|          | CUENTAS DE FONDO (F) [cp50m] | CUENTAS DE FONDO Y MUESTRA (C) [cp50m] | CUENTAS DEBIDAS A LA MUESTRA (C-F) [cp50m] | $L_c$<br>$2.33 (F)^{1/2}$ | $L_D$<br>$2.71+4.65 (F)^{1/2}$ |
|----------|------------------------------|--|--|---------------------------|--------------------------------|
| 1        | 3 477                        | 4 002                                  | 525  | 137                       | 276                            |
| *2       | 3 827                        | 3 990                                  | 163  | 144                       | 290                            |
| *3       | 3 523                        | 3 713                                  | 190  | 138                       | 278                            |
| 4        | 3 091                        | 4 003                                  | 912  | 129                       | 261                            |
| 5        | 3 801                        | 4 115                                  | 314  | 143                       | 289                            |
| 6        | 3 228                        | 3 897                                  | 669  | 132                       | 266                            |
| 7        | 3 737                        | 4 120                                  | 383  | 142                       | 286                            |
| 8        | 3 580                        | 4 009                                  | 429  | 139                       | 280                            |
| 9        | 3 311                        | 3 840                                  | 529  | 134                       | 270                            |
| *10      | 3 569                        | 3 839                                  | 270  | 139                       | 280                            |
| 11       | 3 045                        | 3 546                                  | 501  | 128                       | 259                            |
| 12       | 3 113                        | 3 751                                  | 638  | 130                       | 262                            |
| 13       | 3 075                        | 3 502                                  | 427  | 129                       | 260                            |
| *14      | 3 490                        | 3 763                                  | 273  | 137                       | 277                            |
| 15       | 3 282                        | 4 086                                  | 804  | 133                       | 269                            |
| $\Sigma$ | 51 149                       | 58 176                                 | 7 027                                      |                           |                                |

Las determinaciones señaladas con \* no cumplen con que C-F sea mayor que  $2.71 + 4.65 (F)^{1/2}$ , por lo que si usaramos cualquiera de ellas por si sola como resultado para calcular la actividad y tiempo de vida media del  $^{40}\text{K}$ , tendríamos un error mayor al 10 %. Al acumular un tiempo de conteo tan amplio como 750 minutos, estamos disminuyendo el error estadístico, y al trabajar con la sumatoria de todas las cuentas conseguimos que  $\Sigma C - \Sigma F$  no solo sea mayor a  $2.71 + 4.65 (F)^{1/2}$ , sino también a  $14.1 (\Sigma F)^{1/2}$ :

$$\Sigma C - \Sigma F = 7\,027 \text{ cp750m}$$

este valor es mayor que:

$$L_c = 2.33 (\Sigma F)^{1/2} = 2.33 (51\,149)^{1/2} = 527 \text{ cp750m}$$

$$L_D = 2.71 + 4.65(\Sigma F)^{1/2} = 2.71 + 4.65 (51\ 149)^{1/2} = 1\ 054\ \text{cp750m}$$

$$L_Q = 14.1 (\Sigma F)^{1/2} = 14.1 (51\ 149)^{1/2} = 3\ 189\ \text{cp750m}$$

De esta manera, al emplear las sumatorias de las cuentas obtenemos en la determinación una sensibilidad tal que nos permite obtener en la determinación de la actividad y calculo de la vida media del  $^{40}\text{K}$  un error cercano o menor al 10%. Además estas cpm resultantes, y por lo tanto el resultado de desintegraciones por minuto que sufre el  $^{40}\text{K}$ , son un promedio mejor establecido del proceso de decaimiento que se da en el átomo radiactivo.

Usando las sumatorias  $\Sigma C - \Sigma F = 7\ 027\ \text{cp750m}$  para obtener las cuentas por minuto:

$$7\ 027\ \text{cp750m} / 750\ \text{m} = 9.37\ \text{cpm debido a la actividad del } ^{40}\text{K}.$$

Como el sistema de detección empleado tiene la capacidad de detectar 1 de cada 100 desintegraciones para el caso del  $^{40}\text{K}$ , (como se vio en el cálculo de la eficiencia absoluta) por cada 100 desintegraciones se tendrá una cuenta en el instrumento, por lo que la actividad de la muestra debido al  $^{40}\text{K}$  es:

$$\begin{aligned} \text{Actividad (A)} &= (C-F) / 0.01 = 9.37/0.01 \\ &= 937\ \text{desintegraciones por minuto} \end{aligned}$$

$$A = 937\ \text{dpm} \times 1\ \text{minuto}/60\ \text{segundos}$$

$$A = 15.62\ \text{desintegraciones por segundo (dps)}$$

$$A = 15.62\ \text{dps} = 15.62\ \text{Bq} \times \frac{1\ \text{Ci}}{3.7 \times 10^{10}\ \text{Bq}} = 4.22 \times 10^{-10}\ \text{Ci} = 0.422\ \text{nCi}$$

Esta actividad detectada se debe sólo al 10.7 % de los núcleos de  $^{40}\text{K}$  que decaen por captura electrónica emitiendo rayos X de 1.46 MeV y que pueden ser analizados con el instrumento empleado.

La cantidad de potasio elemental contenido en 10 g de cloruro de potasio es:

$$10 \text{ g KCl} \times \frac{1 \text{ mol KCl}}{74.55 \text{ g KCl}} \times \frac{1 \text{ mol K}}{1 \text{ mol KCl}} \times \frac{39.1 \text{ g K}}{1 \text{ mol K}} = 5.2448 \text{ g K}$$

Si la abundancia isotópica del  $^{40}\text{K}$  es de 0.0118% tendremos que el número de átomos de  $^{40}\text{K}$  en la muestra (N) será:

$$N = 5.2448 \text{ g K} \times \frac{1 \text{ mol K}}{39.1 \text{ g K}} \times \frac{6.022 \times 10^{23} \text{ átomos K}}{1 \text{ mol K}} \times \frac{0.0118 \text{ átomos } ^{40}\text{K}}{100 \text{ átomos K}}$$

$$N = 9.5318 \times 10^{18} \text{ átomos de } ^{40}\text{K} / 10 \text{ g KCl}.$$

De estos átomos totales de  $^{40}\text{K}$  solo detectamos el 10.7 % por lo que:

$$N = 9.5318 \times 10^{18} \text{ átomos de } ^{40}\text{K} \times 0.107$$

$$N = 1.0199 \times 10^{18} \text{ átomos de } ^{40}\text{K} / 10 \text{ g KCl}.$$

A estos átomos se debe la actividad detectada, es decir que se tiene una actividad de 15.62 Bq /  $1.0199 \times 10^{18}$  átomos de  $^{40}\text{K}$ , o bien:

$$A = 1.53 \times 10^{-17} \text{ Bq} / \text{átomo de } ^{40}\text{K}$$

Para conocer que actividad radiactiva ingerimos por cada gramo de potasio elemental que consumimos de cualquier fuente, tenemos:

$$A = \frac{1.53 \times 10^{-17} \text{ Bq}}{1 \text{ átomo } ^{40}\text{K}} \times \frac{0.0118 \text{ átomos } ^{40}\text{K}}{100 \text{ átomos K}} \times \frac{6.022 \times 10^{23} \text{ átomos K}}{1 \text{ mol K}} \times \frac{1 \text{ mol K}}{39.1 \text{ g K}}$$

$$\text{Actividad} = 27.83 \text{ Bq} / \text{g K elemental.} \quad \sigma = (27.83)^{1/2} = \pm 5.27$$

Como se vio en el capítulo 1, el nivel de radiactividad (A) de cualquier muestra radiactiva es igual al producto de la constante de decaimiento ( $\lambda$ ) por el número de átomos presentes en la muestra (N).

$$\text{Si } A = \lambda \times N, \text{ entonces } \lambda = A/N = 937 \text{ dpm}/1.0199 \times 10^{18}$$

$$\lambda = 9.18 \times 10^{-16} \text{ min}^{-1}$$

$$\lambda = 9.18 \times 10^{-16} \text{ min}^{-1} \times \frac{60 \text{ min.}}{1 \text{ h}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 4.8250 \times 10^{-10} \text{ años}^{-1}$$

Calculando el tiempo de vida media física del  $^{40}\text{K}$ :

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / 4.8250 \times 10^{-10} \text{ años}^{-1}$$

$$t_{1/2} = 1.4365 \times 10^9 \text{ años}$$

Como se dijo antes, el error esperado en la determinación es menor al 10%. Los tiempos de vida media extremos reportados en la literatura son:  $1.26 \times 10^9$  años el menor y  $1.48 \times 10^9$  años el mayor. (11) Como puede verse, el valor obtenido por nosotros difiere tan solo en un 2.93% del mayor valor reportado en la literatura.

El procedimiento anterior es un ejemplo de un método a seguir cuando se desea conocer vidas medias extermedamente largas de un radioisótopo.

Los resultados obtenidos en esta sección se resumen en la tabla # 5:

Tabla # 5. Resultados de actividad y tiempo de vida media del  $^{40}\text{K}$

| EFICIENCIA EN LA DETECCIÓN [ctas./rad] | ACTIVIDAD [Bq/10 g de KCl] | ACTIVIDAD [Bq/g de K] | $\lambda$ [años <sup>-1</sup> ] | TIEMPO DE VIDA MEDIA [años] |
|--|----------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 0.01                                   | 15.6166                    | 27.83 ± 5.27          | 4.8250 × 10 <sup>-10</sup>      | 1.4365 × 10 <sup>9</sup>    |

Los resultados obtenidos fueron tal como lo esperábamos: fue posible cuantificar la actividad debida al isótopo radiactivo del potasio elemental (el potasio-40) y determinar su tiempo de vida media física con un error cercano al 10%. Esto se logro al acumular las cuentas radiactivas durante 750 minutos, pues como se ve en la tabla # 4, existían determinaciones (las señaladas con asterisco) en las que las cuentas debidas a la actividad de la muestra (C-F) no conseguían estar por encima del límite de sensibilidad que nos permitía obtener un error estadístico menor al 10%. Esto se debe a que el decaimiento de un núcleo radiactivo es un proceso al azar; no se sabe en que momento 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.

Con respecto al cálculo del tiempo de vida media del  $^{40}\text{K}$ , con un detector de centelleo acoplado a un analizador monocanal, es posible obtener un resultado completamente dentro de los valores reportados en la literatura; por supuesto que esto no sería posible si el conteo no se hubiera realizado durante tanto tiempo.

En el instrumento empleado es posible obtener muy buenas eficiencias absolutas de detección, considerando que las radiaciones detectadas son muy penetrantes y sin carga, lo cual por principio no permite altas eficiencias en comparación con otros instrumentos. Sin embargo, el análisis cualitativo y cuantitativo de un amplio espectro de radionúclidos se vuelve difícil y muy tardado pues un sistema analizador monocanal solo puede detectar y contar pulsos de cierto tamaño previamente fijado por la colocación del umbral de detección y el ancho de la ventana; esto se efectúa para cierta energía de un radionúclido específico, y para detectar otras energías de radiación sería necesario realizar conteos de radiactividad en la muestra a lo largo de todos los umbrales del

Instrumento e incluso así no se aseguraría estar diferenciando el conteo de dos radionúclidos distintos con energías cercanas, dada la baja resolución energética del detector de centelleo.

Otro inconveniente de este tipo de equipo es que por el diseño tipo pozo del detector, no es posible analizar grandes cantidades de muestra ya que no es posible introducir más que tubos de ensayo cuyo volumen no permite contener más de 10 gramos de muestra. Debido a esto, para el análisis de cualquier alimento en un sistema así es necesario pesar cantidades pequeñas de muestra, y si consideramos que usualmente el nivel de radiactividad de muchos radioisótopos en los alimentos es muy bajo, esto podría provocar que las cuentas debidas a la radiactividad del alimento se confundieran con la radiactividad de fondo o el ruido del equipo.

Finalmente, los resultados resumidos en la tabla # 5 resultan sumamente útiles para obtener datos importantes acerca de la radiactividad en cualquier alimento debido al  $^{40}\text{K}$ : conociendo la cantidad de potasio elemental en un alimento cualquiera, se puede calcular su radiactividad sabiendo que cada gramo de potasio presentara una actividad de  $27.83 \pm 5.27$  Bq. Del mismo modo, la cuantificación de la actividad de  $^{40}\text{K}$  en un alimento puede conducirnos a la cantidad de potasio elemental que este contiene.

## 2. DETERMINACIÓN DE $^{137}\text{Cs}$ Y $^{40}\text{K}$ EN MUESTRAS DE ALIMENTOS

Para detectar y cuantificar el nivel de radiactividad en dos muestras distintas de alimentos, se empleó un detector semiconductor de Germanio Hiperpuro (GeHP) [conectado a un bastecedor de voltaje que proporciona al sistema 2500 V], contenido en un termo enfriado con nitrógeno líquido a  $77^\circ\text{K}$  y rodeado de un gran blindaje de plomo para reducir la radiación de fondo. El detector esta acoplado a un sistema electrónico que

consta de preamplificador, amplificador, sistema analizador multicanal, registrador de pantalla y sistema de computo; este sistema funciona como se explicó en el capítulo 3.

La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias permitió el uso de este equipo en sus instalaciones y nos proporciono las muestras de alimentos que se analizaron.

#### 5.2.1 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA ANALIZADOR MULTICANAL CON DETECTOR SEMICONDUCTOR DE GERMANIO HIPERPURO

Dado que el análisis de radiactividad se baso en detección y cuantificación de radiación gama, para calibrar el sistema fue necesario emplear una fuente radiactiva estándar con actividad original de 4.852  $\mu\text{Ci}$  (179.5 Bq). Este estándar sólido de radionúclidos mezclados en una matriz epoxi de masa de 498.3 g se encontraba contenido en un vaso Marinelli de 500 ml; los radionuclidos dispersados en el nos proporcionaron un amplio intervalo de energías de rayos gama (88 a 1836 KeV). En el certificado de calibración de la fuente estándar multinúclidos proporcionado por el fabricante (Isotope Products Laboratories), se asienta la información antes señalada y la que se encuentra en la tabla # 6.

La calibración del sistema se efectúa para un análisis cualitativo y cuantitativo de la muestra. El primero sirve para detectar si existe radiactividad gama en la muestra y de que energía es esta; conociendo la energía de la radiación gama es posible saber de que emisor se trata, determinando así si la radiactividad proviene de emisores naturales (como el  $^{40}\text{K}$ ) o contaminantes. En caso de detectar emisores gama contaminantes, se realiza un análisis cuantitativo para obtener el nivel de radiactividad en el alimento o muestra para lo cual es necesaria la segunda calibración.

Tabla # 6.

Radionúclidos usados como estándar en el analizador multicanal.  
Fecha de elaboración: 1 Agosto 1996

| Energía del rayo gama ((KeV) | Núclido | Vida media (días) | Rendimiento Y (%) | Actividad (µCi) | Gamas por segundo | Incertidumbre total |
|------------------------------|---------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 88                           | Cd-109  | 462.6             | 3.63              | 1.376           | 1 848             | 3.3 %               |
| 122                          | Co-57   | 271.79            | 85.6              | 0.05219         | 16 453            | 2.3 %               |
| 159                          | Te-123m | 119.7             | 84.0              | 0.06478         | 2 013             | 2.4 %               |
| 320                          | Cr-51   | 27.706            | 9.86              | 1.7549          | 6 402             | 2.5 %               |
| 392                          | Sn-113  | 115.09            | 64.89             | 0.2515          | 6 038             | 2.4 %               |
| 514                          | Sr-85   | 64.849            | 98.4              | 0.3147          | 11 460            | 2.4 %               |
| 662                          | Cs-137  | 30.17 años        | 85.1              | 0.2264          | 7 129             | 2.3 %               |
| 898                          | Y-88    | 106.63            | 94.0              | 0.5421          | 18 850            | 2.3 %               |
| 1 173                        | Co-60   | 5.272 años        | 99.86             | 0.2690          | 9 939             | 2.4 %               |
| 1 333                        | Co-60   | 5.272 años        | 99.98             | 0.2690          | 9 951             | 2.4 %               |
| 1 836                        | Y-88    | 106.63            | 99.36             | 0.5421          | 19 930            | 2.3 %               |

La fecha en de trabajó con el sistema analizador multicanal fue el 1 de Octubre de 1997, por lo que transcurrieron 1.16 años desde la elaboración del estándar. Debido a esto, la actividad del radionúclido de vida media más corta (<sup>51</sup>Cr) declinó tanto que a la fecha de determinación ya era despreciable e incluso no se detectó.

#### 5.2.1.1 CALIBRACIÓN EN ENERGÍA (Energía contra número de canal)

Esta calibración proporciona datos útiles únicamente para un análisis cualitativo de la muestra. El estándar Multinúclido se coloca en el detector de la misma manera en que será colocada la muestra. Una vez fijado el tiempo de detección en 1000 segundos, se enciende el instrumento que empieza a detectar y clasificar los pulsos producidos por los rayos gama que van incidiendo sobre el detector. Al final de los 1000 segundos aparece en la pantalla del

registrador una serie de líneas verticales que corresponden a cada una de las energías de rayos gama detectadas y que fueron colocadas automáticamente por el instrumento sobre el eje horizontal en un canal correspondiente a su energía.

De esta manera, se obtiene todo un espectro de energías con un número de canal bien establecido. Graficando el número de canal contra la energía correspondiente, obtenemos una recta con su ecuación, en la que puede extra o interpolarse la energía de un emisor gama conocido para saber en que número de canal aparecería. El mismo sistema elabora esta gráfica y proporciona la ecuación de la recta, así, al analizar una muestra que contiene radionúclidos desconocidos, el instrumento despliega las energías recibidas con su número de canal; dado que la energía del rayo gama emitido por cada radionúclido es característica de este último, conociendo la energía detectada se sabe que emisor está presente.

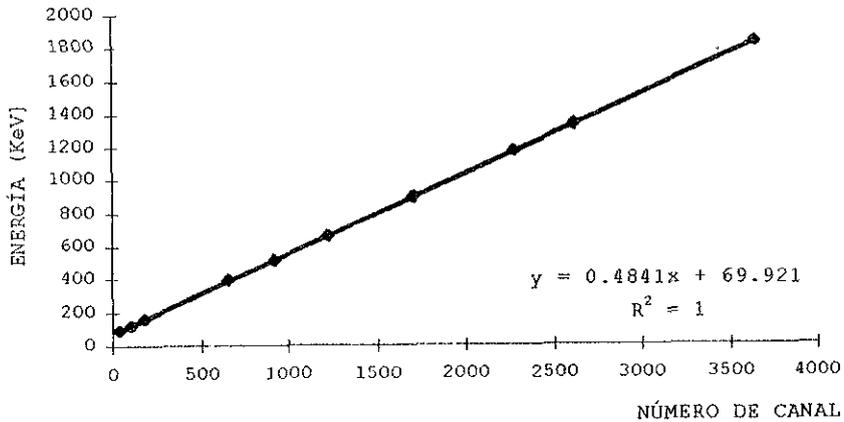
Los resultados de la calibración en energía se muestran en la tabla # 7 y aparecen gráficamente en la gráfica # 3.

Tabla # 7. Resultados de calibración en energía del analizador multicanal.

| NÚCLIDO            | ENERGÍA (KeV) | NÚMERO DE CANAL |
|--------------------|---------------|-----------------|
| <sup>109</sup> Cd  | 88            | 38              |
| <sup>57</sup> Co   | 122           | 108             |
| <sup>123m</sup> Te | 159           | 184             |
| <sup>113</sup> Sn  | 392           | 663             |
| <sup>85</sup> Sr   | 514           | 918             |
| <sup>137</sup> Cs  | 662           | 1 223           |
| <sup>88</sup> Y    | 898           | 1 711           |
| <sup>60</sup> Co   | 1 173         | 2 279           |
| <sup>60</sup> Co   | 1 333         | 2 609           |
| <sup>88</sup> Y    | 1 836         | 3 648           |

### Gráfica # 3

#### CALIBRACIÓN EN ENERGÍA DEL ANALIZADOR MULTICANAL



La ecuación de la recta fue:  $y = 0.4841 X + 69.921$ , en donde "y" es la energía y "X" el número de canal. Por el coeficiente de variabilidad podemos ver que los datos obtenidos se comportan de forma completamente lineal.

La energía característica del rayo X emitido por el  $^{40}\text{K}$  al decaer a  $^{40}\text{Ar}$  es de 1460.8 KeV; esta se sustituye en la ecuación obteniéndose el número de canal en que este emisor aparecerá si está presente en los alimentos:

$$X (\# \text{ canal}) = (1460.8 - 69.921)/0.4841 = 2873.1233$$

O bien, puede interpolarse la energía característica del  $^{40}\text{K}$  (1460.8 KeV) directamente en la gráfica y obtener el número de canal.

#### 5.2.1.2 CALIBRACIÓN EN EFICIENCIA (Eficiencia contra Energía)

Esta calibración es necesaria para realizar un análisis cuantitativo de radiactividad. El tiempo de conteo en este caso fue de 4450 segundos, colocando el estándar de la misma manera como se hace con la muestra.

Un instrumento como el empleado va recibiendo los pulsos de diferentes tamaños según la energía de la radiación incidente y los clasifica y acumula de acuerdo a su altura en distintos canales, ofreciendo en la pantalla del registrador las líneas mencionadas en la calibración por energías. La altura de estas líneas corresponde al número de pulsos recibidos para cada una y si estas líneas se amplifican aparecen como curvas; el área bajo la curva corresponde al conteo neto de esa energía de radiación. El instrumento nos proporciona la siguiente información: Área bajo la curva, Integral (ruido de fondo + área) y energía de la radiación con su número de canal y ancho a la altura media (FWHM).

Para obtener la resolución del equipo basta dividir el FWHM entre la energía de la radiación; así, el porcentaje de resolución en cada caso se obtiene:  $\% R = (\text{FWHM} / \text{Energía}) \times 100$ . Entre menor sea el  $\% R$ , el detector tendrá mejor capacidad para separar dos radiaciones de energías similares, es decir, se obtendrá mayor resolución.

Cabe mencionar que un sistema como el empleado reduce la radiación de fondo de manera más eficiente que el analizador monocanal usado en la sección anterior; esto se debe a que el blindaje que posee es más grueso y completo (encierra totalmente al detector) y a que el instrumento está diseñado para clasificar y diferenciar automáticamente la radiación de fondo de la proveniente de la muestra, debido a esto, no es necesario hacer la detección de la radiación de fondo y descontarla del conteo de la muestra como se hizo con el analizador monocanal. Si quisieramos conocer el ruido de fondo basta sustraer el valor del área del valor de la integral.

Los datos obtenidos al desplegar cada una de las líneas que aparecen al analizar el estándar se muestran en la tabla # 8. Todos fueron proporcionados por el instrumento, excepto la resolución que fue calculada.

Tabla # 8. Datos proporcionados por el analizador multicanal para la calibración por eficiencia.

| NÚCLIDO            | ENERGÍA<br>(KeV) | INTEGRAL | ÁREA    | FWHM<br>(KeV) | % RESOLUCIÓN |
|--------------------|------------------|----------|---------|---------------|--------------|
| <sup>109</sup> Cd  | 88               | 156 586  | 74 017  | 2.2537        | 2.56         |
| <sup>57</sup> Co   | 122              | 137 713  | 61 285  | 2.42          | 1.98         |
| <sup>123m</sup> Te | 159              | 84 665   | 18 200  | 2.47          | 1.55         |
| <sup>113</sup> Sn  | 392              | 63 268   | 23 452  | 2.69          | 0.686        |
| <sup>85</sup> Sr   | 514              | 26 142   | 3 035   | 2.3297        | 0.453        |
| <sup>137</sup> Cs  | 662              | 264 675  | 233 829 | 2.8911        | 0.436        |
| <sup>88</sup> Y    | 898              | 47 696   | 21 144  | 2.8097        | 0.312        |
| <sup>60</sup> Co   | 1 173            | 178 079  | 163 525 | 3.1934        | 0.272        |
| <sup>60</sup> Co   | 1 333            | 152 892  | 145 320 | 3.2707        | 0.245        |
| <sup>88</sup> Y    | 1 836            | 15 960   | 12 578  | 3.5676        | 0.194        |

La eficiencia absoluta en la detección de cada energía es la razón del número de radiaciones detectadas (conteo neto) entre el número de radiaciones emitidas. El número de radiaciones detectadas es el área bajo la curva, y para saber cuántas radiaciones emitió cada radionúclido en los 4450 segundos de la detección, debemos conocer su actividad al momento de la detección (Act. 1-X-97) y considerar el porcentaje de cada núclido que decae emitiendo rayos gama (como se hizo con el <sup>137</sup>Cs en la calibración del detector de centelleo).

De acuerdo a la ecuación fundamental del decaimiento radiactivo, la actividad al tiempo t es:  $A = A_0 e^{-\lambda t}$ , siendo  $A_0$  la actividad inicial o al tiempo cero. En este caso el tiempo cero es el de la producción del estándar y como se mencionó antes, transcurrieron 1.16 años desde ese momento hasta la fecha de determinación por lo que  $t=1.16$  años. Para calcular la  $\lambda$  característica de cada radionúclido usamos la fórmula:  $\lambda = \ln 2 / t_{1/2}$ . La fórmula para calcular la eficiencia absoluta queda:

$$E_{abs} = \text{Área} / (\text{Act. 1-X-97 [dps]}) \times Y \times 4,450 \text{ s}$$

La fórmula anterior se empleó para calcular la eficiencia absoluta en la detección de todos los radionúclidos estándar; usando el  $^{137}\text{Cs}$  como ejemplo del cálculo tenemos:

$$\lambda = \text{Ln}2 / 30.17 \text{ años} = 0.0229 \text{ años}^{-1}$$

$$\text{Act. 1-X-97} = 0.2264 \mu\text{Ci} e^{-(0.0229 \times 1.16)} = 0.2264 \mu\text{Ci} e^{-0.0265} = 0.2204 \mu\text{Ci}$$

$$\text{Act. 1-X-97} = 0.2204 \mu\text{Ci} \times 3.7 \times 10^4 \text{ dps}/\mu\text{Ci} = 8154.8 \text{ dps} = 8154.8 \text{ Bq}$$

Los datos de cada radionúclido se presentan en la tabla # 9.

Tabla # 9. Características de los radionúclidos usados como estandar.

| NÚCLIDO            | $t_{1/2}$<br>(años) | $\lambda$ (años <sup>-1</sup> ) | Y %<br>(rad $\gamma$ /des) | Act. 1-X-97<br>( $\mu\text{Ci}$ ) | Act. 1-X-97<br>(dps o Bq) |
|--------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| $^{109}\text{Cd}$  | 1.2674              | 0.5469                          | 3.63                       | 0.7296                            | 26 995.2                  |
| $^{57}\text{Co}$   | 0.7446              | 0.9309                          | 85.6                       | 0.0177                            | 654.9                     |
| $^{123m}\text{Te}$ | 0.3279              | 2.1139                          | 84                         | 0.0055                            | 203.5                     |
| $^{113}\text{Sn}$  | 0.3153              | 2.1983                          | 64.89                      | 0.0196                            | 725.2                     |
| $^{85}\text{Sr}$   | 0.1776              | 3.9028                          | 98.5                       | 0.0034                            | 125.8                     |
| $^{137}\text{Cs}$  | 30.17               | 0.0229                          | 85.1                       | 0.2204                            | 8 154.8                   |
| $^{86}\text{Y}$    | 0.2921              | 2.3729                          | 94                         | 0.0345                            | 1 276.5                   |
| $^{60}\text{Co}$   | 5.272               | 0.1314                          | 99.86                      | 0.2309                            | 8 543.3                   |
| $^{60}\text{Co}$   | 5.272               | 0.1314                          | 99.98                      | 0.2309                            | 8 543.3                   |
| $^{86}\text{Y}$    | 0.2921              | 2.3729                          | 99.36                      | 0.0345                            | 1 276.5                   |

Los radionúclidos sombreados son los de menor tiempo de vida media, aún cuando todavía presentan actividad, esta ya se ha reducido sensiblemente en los 1.16 años transcurridos, por lo que

los resultados obtenidos de ellos no serían muy confiables y es mejor no considerarlos.

Aplicando la fórmula de la eficiencia a cada radionuclido, se obtuvieron los resultados de la tabla # 10. Por ejemplo para  $^{137}\text{Cs}$ :

$$E_{\text{abs}} = 233,829[\text{cts.}] / 8,154.8[\text{des./s}] \times 0.851[\text{rad.y/des.}] \times 4,450[\text{s}]$$

$$E_{\text{abs}} = 233\ 829\ \text{cts.} / 3.088 \times 10^9\ \text{rad.y} = 0.007571\ \text{cts./rad.y}$$

$$\% E_{\text{abs}} = E_{\text{abs}} \times 100 = 0.7571$$

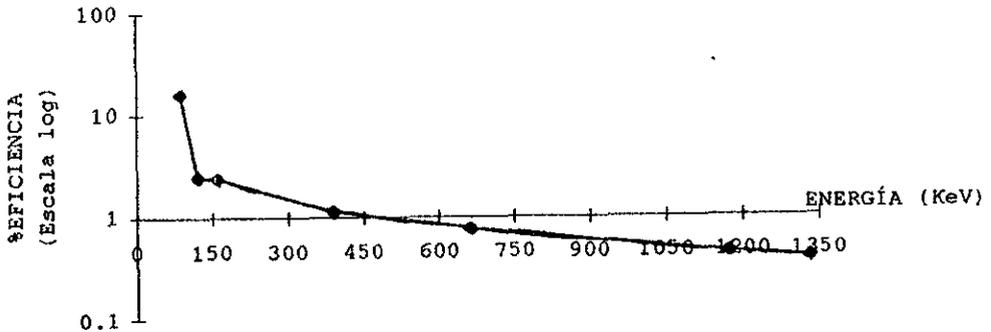
Tabla # 10. Resultados de calibración por eficiencia del analizador multicanal.

| NÚCLIDO                   | ENERGÍA<br>(KeV) | EFICIENCIA<br>ABSOLUTA | % EFICIENCIA<br>ABSOLUTA |
|---------------------------|------------------|------------------------|--------------------------|
| $^{109}\text{Cd}$         | 88               | 0.0169                 | 1.6109                   |
| $^{57}\text{Co}$          | 122              | 0.0245                 | 2.45                     |
| $^{123\text{m}}\text{Te}$ | 159              | 0.0239                 | 2.39                     |
| $^{113}\text{Sn}$         | 392              | 0.01119                | 1.119                    |
| $^{137}\text{Cs}$         | 662              | 0.007571               | 0.7571                   |
| $^{60}\text{Co}$          | 1 173            | 0.004307               | 0.4307                   |
| $^{60}\text{Co}$          | 1 333            | 0.003823               | 0.3823                   |

Graficando el porcentaje de eficiencia en un eje de ordenadas logarítmicas contra la energía como variable independiente, se obtiene la gráfica # 4. Esta es una curva de comportamiento logarítmico con ecuación:  $y = 3.11 X^{-0.928}$ , en donde "y" es el porcentaje de eficiencia y "X" la energía.

Sustituyendo la energía del radioisótopo detectado en la muestra en esta ecuación, o bien, extra o interpolándola directamente en la curva, obtenemos la eficiencia en la detección correspondiente.

Gráfica # 4.

CALIBRACIÓN EN EFICIENCIA  
DEL ANALIZADOR MULTICANAL

Al emplear un sistema analizador multicanal para el análisis de alimentos es posible realizar la detección y cuantificación de una serie de radionúclidos al mismo tiempo, sin necesidad de hacer ningún ajuste aparte de la calibración del instrumento. Esta ventaja se debe a la combinación de un analizador multicanal que recibe y detecta un amplio rango de energías, con un detector de Germanio Hiperpuro que ofrece muy buena resolución y permite diferenciar entre dos energías distintas pero muy cercanas que provienen de núclidos diferentes. Aún cuando la eficiencia que se obtiene con este sistema es menor que la lograda utilizando un detector de centelleo, es posible realizar determinaciones de radiactividades muy bajas ya que pueden emplearse volúmenes mucho mayores de muestra.

El uso de un sistema como éste en el análisis de alimentos facilita la determinación, pues las muestras pueden ser analizadas cualitativamente tal cual llegan (únicamente se colocan en una bolsa de plástico extra que no tenga fugas, para evitar que algo de la muestra pueda salir y contaminar el detector) colocándolas sobre el detector y realizando el análisis de energía para verificar si existen radionúclidos contaminantes emisores de radiación

electromagnética; en caso de que no sea así, ya no es necesario transferir la muestra a un vaso Marinelli ni realizar el análisis cuantitativo.

### 5.2.2 ANÁLISIS DE MUESTRAS DE ALIMENTOS

La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) analiza periódicamente muestras diversas: agua potable, de ríos y de lluvia; tierra; pasto y plantas forrajeras; carne de pollo, res y cerdo; pescados frescos, enlatados, secados o procesados; hojas de plantas comestibles como plátano y hortalizas; frutas y verduras; subproductos alimenticios como grasa butírica, entre muchas otras producidas en las cercanías de la planta nucleoelectrónica de Laguna Verde, Veracruz. Estos análisis son un control extra del que se lleva cabo en los laboratorios de la nucleoelectrónica, para corroborar y asegurar que esta funciona segura y correctamente y que no existen fugas de material radiactivo al ambiente. El área de muestreo comprende un radio de aproximadamente 15 Km. alrededor de la planta nucleoelectrónica y abarca poblados y tierras de cultivo y ganaderas; además, se analizan productos del mar como pescados enlatados o frescos, ostras, algas marinas, etc.

La CNSNS también se encarga de analizar muestras de alimentos que van a introducirse al país vía importaciones, para asegurar la inocuidad toxicológica, en cuanto a radiactividad, de los alimentos provenientes de otros países. A solicitud de instituciones o empresas analizan también gran variedad de muestras, alimenticias o no, que se sospecha están contaminadas con radioisótopos.

Debido a que la institución mencionada recibe y analiza constantemente muestras de alimentos, y a que cuenta con el equipo adecuado para este fin, se solicitó su colaboración para el presente trabajo. Fue así como nos proporcionaron las muestras

analizadas y nos permitieron usar el detector semiconductor acoplado al analizador multicanal.

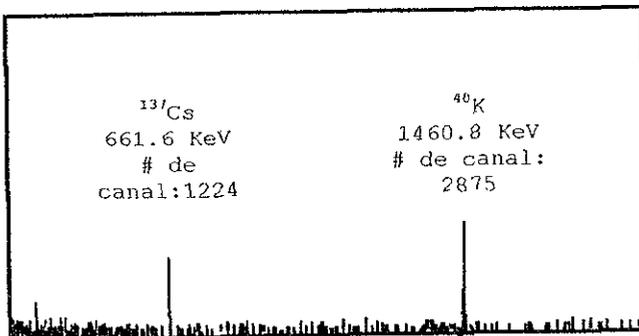
#### 5.2.2.1 ANÁLISIS DE LECHE EN POLVO

La muestra de leche en polvo que se nos proporciono provenia de Polonia. Esta se retuvo en la CNSNS pues se encontró que estaba contaminada. Se almaceno con la clasificación SM-792. La muestra de 285 g estaba contenida en un vaso Marinelli de 500 ml y en éste mismo recipiente se analizó.

Una vez calibrado el sistema como se describió anteriormente, se procedió a colocar el vaso Marinelli con la muestra en el detector, se tapo este último con su blindaje especial y se programó el instrumento para un tiempo de conteo de 1000 segundos. Transcurrido este tiempo se procedió al análisis cualitativo, observando en la pantalla del registrador dos líneas verticales: una en el canal número 1224, correspondiente a una energía de 661.6 KeV, característica de los rayos  $\gamma$  emitidos por el  $^{137}\text{Cs}$ ; la otra en el canal numero 2875, al que corresponde la energía de 1460.8 KeV, característica de los rayos X emitidos por el  $^{40}\text{K}$ . La imagen proporcionada por el registrador se muestra en la figura # 6.

Figura # 6

Análisis cualitativo de la muestra de leche en polvo contaminada. Imagen y datos proporcionados por el analizador multicanal.



Así se pudo conocer los radionúclidos presentes en la leche, procediéndose a su cuantificación. Para esto se amplificó en la pantalla cada una de las líneas y se obtuvo su área bajo la curva. Posteriormente se calculo la eficiencia absoluta en la detección a partir de la ecuación de calibración y la actividad correspondiente. Los resultados se presentan en la tabla # 11:

Tabla # 11. Resultados del análisis de leche en polvo contaminada.

| NÚCLIDO<br>DETECTADO | ÁREA BAJO<br>LA CURVA<br>[cuentas] | EFICIENCIA EN<br>LA DETECCIÓN<br>[cuentas/rad $\gamma$ ] | ACTIVIDAD<br>[dps o Bq] | ACTIVIDAD<br>ESPECIFICA<br>[dps o Bq/Kg] |
|----------------------|------------------------------------|--|-------------------------|--|
| <sup>137</sup> Cs    | 79                                 | 0.0075   | 12.3776                 | 43.4301                                  |
| <sup>40</sup> K      | 77                                 | 0.003597   | 200.1741                | 702.3655                                 |

La eficiencia se obtuvo sustituyendo la energía de cada radionúclido en la ecuación obtenida en la calibración por eficiencia:

$$\text{Eficiencia}_{\text{abs}} = 3.11 (\text{Energía})^{-0.928}$$

La actividad se calculó con la fórmula:

$$\text{Actividad} = \frac{\text{Área [cuentas]} \cdot \gamma}{\text{Eficiencia [cts./rad. } \gamma \text{ x Y [rad. } \gamma \text{/des.] x t [seg.]}}$$

La actividad específica se obtuvo dividiendo la actividad entre los Kilogramos de muestra.

CÁLCULOS:

•  $^{137}\text{Cs}$

$$\text{Eficiencia} = 3.11 (661.6)^{-0.928} = 0.0075$$

$$\text{Actividad} = \frac{79 \text{ cts.}}{0.0075 \text{ cts/rad } \gamma \times 0.851 \text{ rad } \gamma/\text{des} \times 1000 \text{ seg.}}$$

$$\text{Actividad} = 12.3776 \text{ des/seg. (dps)}$$

$$\text{Actividad específica} = 12.3776 \text{ dps} / 0.285 \text{ Kg} = 43.4301 \text{ dps/Kg}$$

•  $^{40}\text{K}$

$$\text{Eficiencia} = 3.11 (1460.8)^{-0.928} = 0.003597$$

$$\text{Actividad} = \frac{77 \text{ cts.}}{0.003597 \text{ cts./rad } \gamma \times 0.1070 \text{ rad } \gamma/\text{des} \times 1000 \text{ seg.}}$$

$$\text{Actividad} = 200.1741 \text{ dps}$$

$$\text{Actividad específica} = 200.1741 \text{ dps} / 0.285 \text{ Kg} = 702.3655 \text{ dps/Kg}$$

De los radionúclidos detectados y cuantificados esperábamos encontrar al  $^{40}\text{K}$ , por ser un radioisótopo de ocurrencia natural; sin embargo el  $^{137}\text{Cs}$  es un contaminante que no debería estar presente en ningún alimento.

Ambos radioisótopos emiten radiación electromagnética, aunque de distinta naturaleza y energía, pues mientras el  $^{40}\text{K}$  emite rayos X de 1460.8 KeV, el  $^{137}\text{Cs}$  emite rayos  $\gamma$  de 662 KeV. Ambas emisiones son energía ionizante por lo que pueden causar daño a los seres vivos, especialmente el  $^{137}\text{Cs}$  pues además ser contaminante, emite rayos  $\gamma$  con una energía menor a la de los rayos X del  $^{40}\text{K}$ ; debe

recordarse que emisiones radiactivas de menor energía son mas peligrosas por poseer una Energía Linear de Transferencia (LET) mayor, lo cual hace que entreguen su energía más rápidamente y en espacios menores, causando una ionización mas localizada que puede provocar mayor daño.

Tanto el  $^{137}\text{Cs}$  como el  $^{40}\text{K}$ , cuando se ingieren, se distribuyen por todo el cuerpo depositándose especialmente en los músculos; esta distribución generalizada hace que sus efectos en el organismo sean similares a los de una exposición por fuentes externas. Como no se depositan en ningún órgano o tejido específico, la dosis total se encuentra distribuida por todo el cuerpo. Esta distribución generalizada o uniforme dentro del organismo favorece la probabilidad de ocurrencia de los efectos estocásticos como el acortamiento de la vida, daños genéticos, teratogenicos o carcinogenicos por lo que el grupo mas amplio de tumores es causado por radioisótopos con distribución uniforme; sin embargo con los efectos no estocásticos sucede lo contrario ya que para que estos se presenten es necesario rebasar cierta dosis umbral y si tenemos un radionúclido concentrado en un órgano o tejido, este recibirá una dosis localizada más alta que puede estar por encima de la dosis umbral.

Aunque el alimento analizado estaba contaminado, la actividad debida al radionúclido de ocurrencia natural, el potasio-40, es más de 16 veces superior que la debida al cesio-137 contaminante. Además, el nivel de este radionúclido en la leche analizada no resulta peligroso en absoluto pues su actividad específica de 43.4301 dps/Kg de leche (que es igual a 43.4301 Bq/Kg) se encuentra muy por debajo del limite máximo permisible estipulado en la NOM-008-SSA1-1994 (15) y mostrado en la tabla # 12:

Tabla # 12. LMP de radionúclidos en alimentos según la NOM-008

| ESPECIFICACIONES                      | FACTOR DE DOSIS POR UNIDAD DE INGESTIÓN [Sv/Bq] | LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES (LMP) [Bq/Kg] |
|---------------------------------------|---|---|
| <sup>134</sup> Cs + <sup>137</sup> Cs | 10 <sup>-8</sup>                                | 100.0                                     |
| <sup>90</sup> Sr                      | 10 <sup>-7</sup>                                | 10.0                                      |

Como los niveles máximos permisibles estipulados en la norma están fijados para asegurar que por debajo de ellos no exista riesgo de daño, podemos decir que esta leche no representa un peligro a la salud en caso de que alguien la bebiera, especialmente porque la leche en polvo requiere rehidratarse para consumirla, con lo que se diluiría aún mas la concentración del radionúclido. Sin embargo, esta leche no es un alimento de óptima calidad pues presenta contaminación radiactiva.

Las determinaciones realizadas no son suficientes para evaluar un posible daño, pues con los datos obtenidos es imposible estimar la dosis relativa depositada en los tejidos en caso de que la actividad de <sup>137</sup>Cs encontrada ingresara al cuerpo. Para esto sería necesario realizar estudios biológicos y determinar la dosis de exposición, la dosis absorbida en el cuerpo y si el cesio radiactivo ingerido se encontraba de forma soluble para ser absorbido íntegramente del tracto gastrointestinal a la sangre.

Lo que sí es posible determinar es el tiempo de vida media efectiva (Te) del cesio dentro del organismo; como se vio en 3.1.4, la retención del núclido radiactivo en el cuerpo depende tanto de su vida media física (Tp) como de su vida media biológica (Tb). Sabemos que Tp =30 años, Tb =105 a 140 días (0.2876 a 0.3835 años) y  $Te = Tb Tp / Tb + Tp = 0.2848$  a  $0.3786$  años, que son 104 a 138 días; este tiempo de vida media efectivo es muy corto por lo que el daño que pudiera causar el cesio-137 dentro del cuerpo seria mucho menor que el de un radioisótopo con localización selectiva como el estroncio-90 que se fija en los huesos y al igual que el <sup>137</sup>Cs emite

partículas beta, o alguno de los isótopos radiactivos del plutonio que también se fijan en los huesos y son emisores alfa con largos tiempos de vida media física y biológica.

#### 5.2.2.2 ANÁLISIS DE CARNE DE RES MOLIDA

Esta muestra de carne procedía de Palmasola, Veracruz, poblado que se encuentra a 6 Km. de Laguna Verde y en el que se realiza agricultura temporal anual. El análisis de muestras de alimentos provenientes de este lugar son llevados a cabo semestralmente por la CNSNS, en los meses de Abril y Septiembre. El peso de la muestra fue de 275.65 g.

El análisis se llevo a cabo de la misma manera que para la leche en polvo, pero en este caso en el análisis cualitativo solo apareció la línea correspondiente a la energía de los rayos X emitidos por el  $^{40}\text{K}$ , así que esta muestra no estaba contaminada. Se procedió a cuantificar la actividad de este radonúclido obteniéndose los resultados de la tabla # 13:

Tabla # 13. Resultados del análisis de carne de res molida.

| NÚCLIDO<br>DETECTADO | ÁREA BAJO<br>LA CURVA<br>[cuentas] | EFICIENCIA<br>[cuentas/rad $\gamma$ ] | ACTIVIDAD<br>[dps o Bq] | ACTIVIDAD<br>ESPECIFICA<br>[dps o Bq/Kg] |
|----------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|--|
| $^{40}\text{K}$      | 33                                 | 0.003597                              | 85.7412                 | 311.0510                                 |

Para el  $^{40}\text{K}$ :

$$\text{Eficiencia} = 3.11 (1460.8)^{-0.928} = 0.003597$$

33 cts.

$$\text{Actividad} = \frac{33 \text{ cts.}}{0.003597 \text{ cts./rad } \gamma \times 0.1070 \text{ rad } \gamma/\text{des} \times 1000 \text{ seg.}}$$

$$\text{Actividad} = 85.7412 \text{ dps}$$

$$\text{Actividad especifica} = 85.7412 \text{ dps} / 0.27565 \text{ Kg} = 311.0510 \text{ dps/Kg}$$

En esta carne no detectamos la presencia de radionúclidos contaminantes emisores de radiación electromagnética. Esto indica que no existieron fugas en la Central Nuclear de Laguna Verde que pudieran llegar a la carne que se produce en la población de Palmasola por lo que la carne puede ser consumida sin riesgo alguno.

El análisis de carne de res molida nos sirvió también para corroborar que todos los alimentos contienen potasio radiactivo en la medida que contienen potasio elemental (recuérdese que 0.0118% del potasio elemental es  $^{40}\text{K}$ ), y en muchos casos como en este, en un nivel alto (311.0510 Bq/Kg).

Por lo anterior, la cuantificación de potasio-40 es empleada para conocer la cantidad total de potasio elemental en una muestra cualquiera, por ejemplo alimentos, reactivos y personas; esto último se lleva a cabo en "contadores de cuerpo entero" y es muy socorrido pues es una manera segura y rápida de conocer el contenido total de potasio en un ser humano lo cual es indicativo de su estado fisiológico: relación masa muscular/tejido adiposo con respecto a peso, edad, sexo, crecimiento, nutrición, etc.(10) Contadores de cuerpo entero se emplean también para medir bajos niveles de radiactividad en estudios de trazado clínico en personas y animales y para mediciones de concentración de radionúclidos como  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{131}\text{I}$  resultantes de pruebas atmosféricas nucleares o accidentes en reactores.(20)

Si consideramos que la mayoría de los alimentos contienen potasio, especialmente las frutas y verduras, nosotros ingerimos altas dosis de potasio radiactivo anualmente ( $27.83 \pm 5.27$  Bq/g K como se ve en la tabla # 5). Esta ingestión de radiactividad no puede evitarse, así como tampoco podemos escapar de inhalar radón o recibir radiactividad de la tierra, la atmósfera, el espacio

exterior o los mismos edificios y cuerpos de los seres vivos. Precisamente por esto es importante que no aumentemos la dosis que recibimos, al exponernos a radionúclidos contaminantes ya sean emisores internos o externos. De aquí que la presencia de  $^{137}\text{Cs}$  en la leche de Polonia sea preocupante: indica un mal manejo de la radiactividad y el material radiactivo pues radionúclidos como este no deben aparecer en alimentos y cuando esto es así, indica un accidente nuclear como fugas o explosiones en reactores (como en el caso del reactor de Chernobil), o probablemente pruebas nucleares realizadas en lugares cercanos a poblaciones.

Por supuesto que como se ha mencionado, es posible que los núclidos radiactivos viajen largas distancias desde su punto de liberación debido a los vientos, las corrientes marítimas o en los mismos alimentos y materias primas que circulan entre los países y sobre los que no se ejerce control (como alimento para animales domésticos que es importado o exportado de un lugar a otro); considerando esto, podemos pensar que la contaminación en esta leche de Polonia pudo provenir de la extensión de la nube radiactiva que se generó por la explosión del reactor nuclear de Chernobil o porque a las vacas se les alimentó con forraje contaminado producido cerca del accidente.

El intenso intercambio comercial que se vive actualmente entre los países facilita la entrada de alimentos contaminados con radiactividad a países donde análisis como el realizado no se llevan a cabo de manera rigurosa y constante.

Aunque la cantidad total de isótopos radiactivos en los alimentos puede disminuirse por procesos como el lavado o pelado, su presencia y niveles deben vigilarse siempre pues los riesgos de daño a la salud que provocan son muy graves.

Los isótopos radiactivos que son ingeridos se convierten en fuentes de radiación internas que pueden tardar muchos años o no eliminarse; esto genera una irradiación crónica cuyos efectos máximos se producen lentamente y la recuperación de ellos es también lenta o poco completa. Se ha comprobado en estudios de cáncer que para radiaciones de bajo LET como las X y  $\gamma$ , si una misma dosis total se recibe a lo largo de la vida de manera fraccionada (crónica), causa menos daño que la misma dosis total en una sola exposición aguda; lo contrario sucede con radiaciones de alto LET y en general para la producción de efectos no estocásticos.

Desafortunadamente los radioisótopos que pueden presentarse en los alimentos emiten radiaciones de bajo y/o alto LET y los efectos que pueden provocar son tanto estocásticos como no estocásticos; de ahí la importancia de que análisis como el realizado se efectúen de manera rutinaria como un método de control de calidad para asegurar la inocuidad de los alimentos que se consumen en el país, especialmente en aquellos en que se sospeche que pueden estar contaminados, como los provenientes de regiones donde han ocurrido accidentes o pruebas nucleares o que sean producidos cerca de centrales nucleares o basureros radiactivos.

Debe señalarse que los análisis de radiactividad realizados se concretaron a energías electromagnéticas, es decir radiación X y  $\gamma$ , y que radionúclidos contaminantes que emitan otras radiaciones como  $\alpha$  y  $\beta$  exclusivamente como el estroncio-90 o el plutonio-238 no serán detectados. Para analizar radionúclidos como estos, es necesario usar otros detectores y técnicas mucho más elaboradas en la preparación de las muestras, pues por ser emisores de partículas con bajo poder de penetración, es necesario eliminar el fenómeno de autoabsorción preparando películas muy delgadas de muestra para asegurar que todas las partículas emitidas lleguen al instrumento y

sean detectadas. Debido a esto, el análisis gama es la técnica más rápida y sencilla para la detección y cuantificación de radionúclidos en alimentos. Si acaso se sospechara de la presencia de otros radionúclidos que no emiten radiación electromagnética, serán necesarias otras técnicas de análisis.

La radiación  $\gamma$  tiene características muy específicas que la diferencian de las partículas radiactivas: alto poder de penetración, baja ionización específica y por lo tanto bajo LET y baja efectividad biológica relativa; el que tenga un LET bajo hace que de entre los tres tipos de emisiones que se han venido mencionando ( $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$ ) sea la menos peligrosa. Sin embargo, debido a su gran poder de penetración, al ser ingerida puede afectar no solo los tejidos en los que el radionúclido emisor se deposite, sino también otras regiones del cuerpo, y el hecho de que su ionización específica sea baja, no es suficiente para descartar que la radiación electromagnética sea dañina.

### 5.3 DISCUSIÓN SOBRE LOS INSTRUMENTOS EMPLEADOS

Típicamente se utilizan dos detectores en la espectrometría de rayos  $\gamma$ : los detectores de centelleo, como el de NaI empleado, y los detectores semiconductores de estado sólido como el de Ge(Hp) también usado en este estudio. Las características de ambos son muy distintas y pueden ser revisadas en el capítulo 4. Para fines del análisis de los resultados obtenidos, nos interesan principalmente los datos finales que de ellos obtenemos: la eficiencia absoluta en la detección y la resolución de energías que cada uno ofrece; por supuesto que ambas están relacionadas con las características intrínsecas de cada detector.

Se sabe que en análisis de radiación electromagnética sin carga, no es posible obtener tan buenas eficiencias como en el caso de partículas cargadas ya que las primeras interactúan menos

frecuentemente o de manera parcial con el detector mientras disipan su energía en él, e incluso puede suceder que parte de la radiación emitida pase por el detector sin ocurrir interacción alguna. Sin embargo, pueden obtenerse mejores eficiencias utilizando detectores de centelleo que detectores semiconductores de estado sólido, pues los primeros ofrecen una mayor superficie de detección; con la resolución sucede lo contrario: los detectores de estado sólido como el de Germanio Hiperpuro usado, ofrecen una mejor resolución pues al no requerir de un tubo fotomultiplicador que amplíe el número de electrones que finalmente son registrados, la señal producida por la radiación que originalmente llega al detector y su respectiva energía sufren menos procesos antes de ser registradas y almacenadas por el analizador multicanal. Esto puede verse muy claramente en los resultados que obtuvimos; conjuntando los resultados de eficiencia para cada determinación observamos:

Tabla # 14. Eficiencias en la detección logradas con los instrumentos empleados.

|  | DETECTOR DE CENTELLEO (NaI) | DETECTOR SEMICONDUCTOR DE Ge (Hp) |
|--|-----------------------------|-----------------------------------|
| EFICIENCIA <sub>ABS</sub> EN LA DETECCIÓN DE <sup>40</sup> K   | 0.01                        | 0.003597                          |
| EFICIENCIA <sub>ABS</sub> EN LA DETECCIÓN DE <sup>137</sup> Cs | 0.0240                      | 0.007571                          |

Como puede verse, las eficiencias logradas con el detector de centelleo son mayores que las obtenidas con el detector semiconductor por un factor aproximadamente de 3, lo cual es muy significativo. Sin embargo, debido a su baja resolución, el detector de centelleo no puede usarse para analizar radionúclidos cuya energía de radiación electromagnética es muy cercana.

Por lo anterior, usando un detector semiconductor conectado a un analizador multicanal, generalmente se obtiene mayor información de manera mas rápida y sencilla en cuanto a radionuclidos contaminantes de alimentos, aun cuando un detector de centelleo en iguales condiciones sea mas eficiente.

## 6 CONCLUSIONES

La información reunida sobre los radionúclidos en alimentos resulto suficiente para mostrar su importancia y es lo bastante amplia para que pueda servir como guía a los interesados en el tema y para sustentar la investigación experimental efectuada.

Empleando un sistema analizador monocanal, con detector de centelleo de yoduro de sodio (NaI), es posible calcular la actividad debida al potasio-40 contenido en cloruro de potasio así como el tiempo de vida media física de este radionúclido con un error cercano al 10%.

Es posible obtener mayores eficiencias en la detección de radionúclidos emisores de radiación electromagnética al usar un detector de centelleo, pero las resoluciones de energía son mejores empleando uno de Germanio Hiperpuro.

El uso de analizadores monocanal se restringe al análisis de muestras que contengan radionúclidos conocidos; si deseamos saber qué radioisótopos están en un alimento, es conveniente usar un analizador multicanal.

Métodos como los descritos son útiles únicamente para el análisis de radiosótopos emisores de radiación electromagnética (rayos X y rayos  $\gamma$ ). Detección y cuantificación de emisores  $\alpha$  y/o  $\beta$  requiere otros instrumentos y preparación de muestra. Sin embargo, la espectroscopía gama es la más rápida y fácil de realizar.

En todos los alimentos, seres vivos o materiales que contienen potasio elemental, existe un 0.0118% de este potasio como  $^{40}\text{K}$  radiactivo de cuya dosis no es posible escapar. Este  $^{40}\text{K}$  provee de  $27.83 \pm 5.27$  Bq por cada gramo de potasio elemental que entra al

cuerpo. Además de este radionúclido, los seres vivos están expuestos a otras fuentes de radiactividad natural inevitables, por lo que es importante no aumentar la dosis recibida de fuentes artificiales mediante un control riguroso de la radiactividad generada por el hombre. Un modo de realizar esto es el análisis de radionúclidos en alimentos.

De las muestras alimenticias analizadas, la leche en polvo proveniente de Polonia presentó el radionúclido contaminante  $^{137}\text{Cs}$ , además del radionúclido de ocurrencia natural  $^{40}\text{K}$ . La actividad debida al  $^{137}\text{Cs}$  fué más de 16 veces menor que la del  $^{40}\text{K}$ , además de estar por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la norma mexicana. De aquí que la ingestión de esta leche no representa un riesgo a la salud, pero indica fuga de material radiactivo que no debe de ocurrir.

No existieron fugas de material radiactivo emisor de radiación electromagnética que pudieran llegar de la Nucleoeléctrica de Laguna Verde, Veracruz, a la carne analizada. Análisis como este resultan indispensables para asegurar que esto no este ocurriendo.

A través de la cuantificación de  $^{40}\text{K}$  podemos conocer el contenido total de potasio elemental de cualquier alimento, persona o material.

De acuerdo con lo expuesto a lo largo del estudio, el análisis de radiactividad en alimentos es ya una necesidad y debe practicarse reglamente, especialmente a alimentos importados de regiones en que se hayan dado eventos nucleares y a los producidos cerca de centrales nucleares o depósitos de desechos radiactivos.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) Casarett, W.G. Radiation Histopatology Vol. I. 1ª Ed. CRO Press Inc. Boca Raton, Florida. USA, (1980).
- (2) Concon Jose, M. Food Toxicology Part B. Contaminants and Additives. Marcel Decker Inc., New York & Basel. USA, (1995).
- (3) Currie. L.A. Analytical Chemistry, Vol. 40, No. 586, (1968).
- (4) Darby, S.C. & Inskip, D.P. Ionizing Radiation: Future etiologic research and preventive strategies. Environmental Health Perspectives, Vol. 103, Suppl. 8 (1995)
- (5) Ehmann, W.D. & Vance, D.E. Radiochemistry and Nuclear Methods of Analysis. John Wiley & Sons Inc. USA, (1991).
- (6) Elias, P.S. & Cohen, A.J. Radiation Chemistry of Mayor Food Components. 1ª Ed. Elsevier Scientific Publishing Company, New York. USA, (1977).
- (7) Friedlander, G., Kennedy, J.W., Macias, F.S., Miller, J.M. Nuclear and Radiochemistry. 5ª Ed. John Wiley & Sons Inc. New York. USA, (1991).
- (8) Harrison, J.D. y Stather, J.W. The assessment of doses and effects from intakes of radioactive particles. Journal of Anatomy. No. 189 (1996).
- (9) Hoel David G. Ionizing Radiation and Cancer Prevention. Environmental Health Perspectives. Vol. 103, Suppl. 8. (1995).
- (10) Lahham, A., Fullop, M., Vladary Ragan, P. Body Potassium and radiation dose from <sup>40</sup>K to the Slovak population. Health Physics, Vol. 74, No. 3 (1998)
- (11) Lederer, C.M., Hollander, J.M. y Pearlman. Table of Isotopes. 6ª Ed. John Wiley & Sons, New York. USA, (1967).
- (12) Letourneau, E.G., Krewski, D. Goddard, M.J. Case-Control study of residential radon lung cancer in Winnipeg, Manitoba, Canada. American Journal of Epidemiology, Vol. 140, No. 4, (1994).
- (13) Muirhead, C.R. Radon risks. The Lancet, Vol. 344, (1994).

- (14) Navarrete, M. y Cabrera, L. Introducción al estudio de los radioisótopos. 2ª Ed. UNAM Facultad de Química, Sección Nuclear, Departamento de Química Nuclear, México (1993).
- (15) Norma Oficial Mexicana NOM-088-SSA-1994. Bienes y Servicios. Contaminación por radionúclidos en alimentos de consumo masivo importados. Límites Máximos Permisibles.
- (16) Rickards Campbell, J., Camaras Ross, R. Las radiaciones II. El manejo de las radiaciones nucleares. 1ª Ed. Fondo de Cultura Económica S.A. de C.V. México, (1991).
- (17) Rickards Campbell, J. Las Radiaciones: reto y realidades. 1ª Ed. Fondo de Cultura Económica S.A. de C.V. México, (1986).
- (18) Saunders, P. La radiación y tu. Editado por el Consejo de Seguridad Nuclear. Madrid, España, (1994).
- (19) Shimada, Y., Morisawa, M., Yoneda, M. y Inoue, Y. A dosimetric determination of  $^{137}\text{Cs}$  ingestion from global fallout and related risks to Japanese. Health Physics, Vol. 74, No. 3, (1998).
- (20) Supian Bin Samat y Green, S. A comparison of measurement sensitivity of two different gamma-ray analysis systems for  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$ . Applied Radiation Isotopes, Vol. 48, No. 3, (1997)
- (21) Viel, J.F. Radon exposure and leukemia in adulthood. International Journal of Epidemiology, No. 22, (1993).