

300627



UNIVERSIDAD LA SALLE

19
2ej

ESCUELA DE QUIMICA
INCORPORADA A LA U. N. A. M.

CONTAMINACION RADIATIVA EN LECHE
POSTERIOR A UN ACCIDENTE
NUCLEAR

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
QUIMICO FARMACEUTICO BIOLOGO
P R E S E N T A :
MARIA CELICA MARTINEZ CASTILLO

Director de Tesis: I. Q. Miguel Ortego Arámburu

TRABAJE CON
FALLA DE ORIGEN

México, D. F.

1992



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

CONTENIDO

	página
1. INTRODUCCION	1
1.1 Generalidades	2
1.2 Biografía de la radiactividad	5
2. NATURALEZA DE LA RADIATIVIDAD	12
2.1 Radiación	12
2.1.1 Tipos de decaimiento radiactivo	14
2.2 Tiempos de vida media	16
2.2.1 Tiempo de vida media radiactiva	16
2.2.2 Tiempo de vida media biológica	17
2.2.3 Tiempo de vida media efectiva	17
2.3 Unidades	18
2.4 Radiactividad Natural	20
2.5 Radiactividad Artificial	23
2.6 Fisión y fusión	26
2.7 Reactores nucleares	28
3. VIAS POR LAS QUE LOS CONTAMINANTES RADIATIVOS LLEGAN A LOS ALIMENTOS Y ALCANZAN AL HOMBRE	29
3.1 Ecosistema	30
3.1.1 Ecosistema terrestre	34
3.1.2 Ecosistema acuatico, marino y estuario	41
4. RADIONUCLEIDOS MAS FRECUENTES Y CAUSAS POR LAS QUE SE PRESENTAN EN LOS ALIMENTOS.	45
5. EFECTOS BIOLOGICOS EN EL HOMBRE Y NORMAS SANITARIAS	49
5.1 Efectos biológicos de la radiación	49
5.2 Metabolismo de los radionucleidos en el hombre	57
5.3 Dosis interna por ingestión de alimentos contaminados	65
5.4 Derivación de los valores de orientación del CODEX aplicables a los alimentos tras una contaminación accidental	69

6.	MONITOREO DE RADIOACTIVIDAD EN ALIMENTOS	77
6.1	Muestreo	77
6.2	Pretratamiento	79
6.3	Tratamiento	85
6.4	Equipos a utilizar	91
6.5	Elección del equipo de detección radiactiva	94
7.	TÉCNICAS DE MEDICION PARA RADIONUCLEIDOS EN LECHE	102
7.1	Análisis radioquímico de estroncio-90 en leche	102
7.2	Análisis radioquímico de radioyodos en leche	112
7.3	Análisis cesio-137 en leche	120
8.	GARANTIA DE CALIDAD	125
9.	CONCLUSIONES	129
10.	BIBLIOGRAFIA	131

1. INTRODUCCION

En la mayoría de los países es una práctica común el monitoreo de alimentos, tanto importados como producidos localmente, sin embargo, este monitoreo es llevado a cabo normalmente para contaminantes químicos, adulteraciones, crecimiento de hongos, bacterias etc. El accidente de Chernobyl en abril de 1986, mostró la posibilidad de que los alimentos pudieran estar contaminados por material radiactivo. Cuando el accidente ocurrió muchos de los países en vías de desarrollo y algunos de los países desarrollados no estaban preparados para el monitoreo en gran escala de alimentos. Algunos países todavía no fijaban estándares o límites arriba de los cuales se pudiera considerar a un alimento como contaminado. Después del accidente, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) preparó en Roma una reunión con un grupo de expertos para que tomando en cuenta la situación existente decidir niveles aceptables de contaminación. Posteriormente, expertos de la Organización Mundial de la Salud, la FAO y la Agencia Internacional de Energía Atómica se reunieron varias veces con el mismo objetivo. Como consecuencia de estas actividades se están capacitando científicos de los países en vías de desarrollo encargados de monitorear otros tipos de contaminantes y adulteraciones para llevar a cabo el monitoreo radiactivo.

En este trabajo se pone en evidencia la necesidad de que todos los países cuenten con un sistema de control de alimentos importados y de producción nacional, en cuanto a contaminantes radiactivos que pueden llegar a ellos en una situación de accidente tal como ocurrió en Chernobyl en 1986. Además deben contar dentro de sus leyes y reglamentos con niveles de orientación establecidos.

Como el tema de radiactividad en alimentos es demasiado extenso en este trabajo únicamente se analizará a la leche por ser uno de los alimentos más consumidos por el hombre, además de que es un alimento que tiene un comercio internacional muy grande.

Se hace un resumen de los principios básicos de la radiactividad, interacción de la radiactividad con la materia, fuentes de radiactividad natural y artificial, algunas de las principales fuentes de contaminación incluyendo por ejemplo la lluvia radiactiva por explosión de armas nucleares en la atmósfera, accidentes con reactores nucleares etc. Se ponen en evidencia las rutas críticas al hombre. Se muestran los equipos útiles para este tipo de mediciones así como las técnicas adecuadas para la medición directa o después de una separación radioquímica. Se muestran también pasos importantes como el muestreo, preparación de la muestra, preparación de estándares, calibración de equipos, estadísticas y control de calidad.

1.1 GENERALIDADES

El conocimiento de la existencia del átomo data de los tiempos del filósofo griego Anaxágoras. Pero la primera cadena nuclear de reacción, considerada por los hombres de ciencia de todo el mundo como un verdadero amanecer de la era atómica, fue obtenida el 2 de Diciembre de 1942 en un reactor experimental de la Universidad de Chicago.

La palabra "átomo" deriva de la palabra griega $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ (α , privativo y $\tau\epsilon\mu\nu\omega$, cortar o dividir) que significa "indivisible".

John Dalton es reconocido como el autor de una teoría atómica sólida basada en las leyes de la combinación química que desarrolló de 1803 a 1808 donde establece que:

- a) Los átomos de los elementos son las partículas básicas de la materia. Son indivisibles y no pueden ser creados ni destruidos.
- b) Los átomos de un elemento dado son idénticos, con el mismo peso y las mismas propiedades químicas.
- c) Los átomos de los elementos distintos se combinan entre sí en relaciones enteras sencillas para formar moléculas compuestas.

d) Los átomos de los elementos pueden combinarse en más de una proporción entera sencilla para formar más de un compuesto.

Cada afirmación de Dalton ha tenido que ser retocada a la luz de los descubrimientos modernos, en particular el descubrimiento de la radiactividad y otras reacciones con emisión de energía nuclear (atómica). Sin embargo, todavía son una buena descripción del comportamiento de los átomos en las situaciones químicas ordinarias.

La física moderna ha descubierto más de 30 partículas que son llamadas subatómicas. De éstas solo 3 son las que interesan a la química:

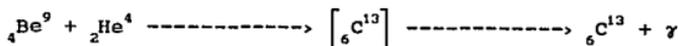
a) *El electrón* que tiene carga eléctrica negativa y una masa de $1/1836$ de la del átomo más ligero (el hidrógeno). En 1874 George Johnstone Stoney sugirió que estas unidades se llamaran electrones.

b) *El protón* que tiene una carga eléctrica positiva y fue descubierto por el físico Wilhelm Wien en 1894 con la primera reacción nuclear en la que se detectaban protones:

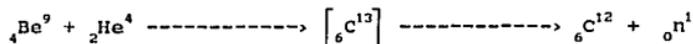


La masa del protón es 1846 veces la masa del electrón.

c) *El neutrón* que no tiene carga y posee una masa aproximadamente igual a la del protón, fue descubierto por James Chadwick en 1932 cuando bombardeó el ${}_4\text{Be}^9$ con partículas alfa que ya se conocían:



Uno de los productos de la reacción parecía ser una clase de radiación muy penetrante y no se detectaban fotones (rayos gamma) como en la reacción anterior. Chadwick propuso la reacción nuclear siguiente:



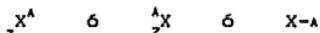
Se considera que el átomo está compuesto por regiones:

- 1) Región nuclear que consta de 2 clases de partículas o nucleones que son los protones y los neutrones.
- 2) Región extranuclear que está compuesta por los electrones.

Como el átomo en su totalidad no tiene carga eléctrica el número de protones en el núcleo es igual al número de electrones de la región extranuclear, por ello, al número de protones se le denomina número atómico (Z) que está relacionado con la identidad de un elemento. A excepción del núcleo del hidrógeno común, los protones y los neutrones del núcleo de un átomo son los que concentran casi totalmente la masa del átomo, ya que los electrones son demasiado ligeros.

Como la masa de un átomo está casi exclusivamente determinada por el número total de nucleones, se denomina número de masa y se representa con la letra A.

Cualquier átomo específico puede designarse como :



donde:

- X es el símbolo del elemento
- z es el número atómico = número de protones
- A es el número de masa = número de nucleones
- A-z es el número de neutrones = N

1.2 BIOGRAFIA DE LA RADIOACTIVIDAD

Henri Becquerel en 1896 comunicó su descubrimiento sobre las sustancias que emitían radiaciones, y con esto empieza una cadena de descubrimientos que 50 años después produjeron el acontecimiento que abre una nueva edad científica y tecnológica: "la era atómica".

Becquerel estaba interesado en el fenómeno de la fosforescencia, estudiado ya por su padre, y pensaba que tanto los rayos X, descubiertos por Roentgen un año antes, como la luz, eran capaces de inducir fosforescencia en cristales formados de sales de uranio, fenómeno por el cual se emitían radiaciones muy penetrantes, que atravesaban la envoltura de papel negro dentro de la que se colocaba una placa fotográfica. Realizó experimentos que le llevaron a la conclusión de que la sustancia fosforescente emite radiaciones que penetran papel opaco a la luz y reducen las sales de plata. Algunos meses después de este primer descubrimiento, siguió otro que demostraba que las radiaciones no eran producto de la fosforescencia inducida, sino radiaciones de una nueva especie emitidas por el Uranio de manera continua. Descubrió también, mediante experimentos adicionales, que la impresión de la placa fotográfica era más intensa si se empleaba uranio metálico en lugar de una sal de uranio, y que la misteriosa emanación descargaba a los cuerpos electrificados con mayor rapidez que en el primer caso.

El matrimonio Curie en 1899 comunicó al mundo científico el descubrimiento de 2 nuevos elementos químicos, ambos radiactivos; este último término fue acuñado para designar la nueva propiedad de la materia, desconocida para Becquerel, de emitir radiaciones. Los nuevos elementos fueron llamados radio y polonio, los cuales se descubrieron al separar el uranio de un mineral llamado pechblenda.

En 1906 murió Pierre Curie, pero su viuda siguió trabajando incansablemente, con el fin de establecer las características de las sustancias radiactivas y las radiaciones que éstas producían, logrando obtener las propiedades del radio y las características del fenómeno de la radiactividad. Cabe mencionar que era necesario tratar varias toneladas del residuo dejado por la pechblenda para obtener algunos decigramos de los nuevos elementos radiactivos.

Las posibilidades que estos descubrimientos ofrecieron fueron aprovechadas casi de inmediato por otros investigadores. Ernest Rutherford hizo experimentos que condujeron al conocimiento del comportamiento de las radiaciones al atravesar la materia; dedujo la naturaleza de las radiaciones y descubrió que el "Torio" decaía a otros elementos que también eran radiactivos. El descubrimiento más importante de Rutherford fue la transmutación de la materia, vieja fantasía de los alquimistas medievales, que él volvió realidad en 1919, al irradiar nitrógeno con partículas alfa, radiación emitida por los materiales naturalmente radiactivos, transformándose así el nitrógeno en oxígeno.

En 1932 James Chadwick hizo el experimento de irradiar elementos ligeros, como el berilio y boro, con partículas alfa provenientes del polonio. Obtuvo una radiación emitida por el elemento que actuaba como blanco, de mayor alcance que las partículas alfa usadas para el bombardeo y que no presentaban carga eléctrica y concluyó que la radiación no consistía de cuantos como se había supuesto, sino de "neutrones", partículas de masa 1 y de carga 0.

En 1932 John Cockcroft reportó que le había sido posible acelerar núcleos de hidrógeno y protones hasta energías de 700 000 electron-voltios al someterlos a grandes voltajes, y que irradiando con ellos a muchos elementos se obtenían partículas alfa hasta entonces sólo producidas por los metales uranio, polonio y radio naturalmente radiactivos.

En 1933 Carl D. Anderson realizó el descubrimiento de una partícula con igual masa que el electrón, o sea, $1/1832$ aproximadamente de la masa del protón y con carga eléctrica positiva, a la cual se le llamó *positrón*, y a los electrones con carga negativa encontrados por la señora Curie, como emanaciones del radio, *negatrones*.

Hasta este punto había sido establecida la naturaleza de las radiaciones, así como el hecho de que las reacciones nucleares transformaban unos elementos en otros. Pero lo que no se había encontrado eran reacciones nucleares inducidas por el hombre que pudieran formar elementos radiactivos, es decir, que todo los descubrimientos anteriores abrieron el camino para la obtención de sustancias radiactivas diferentes a las descubiertas en la naturaleza y para la elaboración en el laboratorio, de nuevos elementos químicos.

La posibilidad de crear elementos radiactivos artificiales condujo a un gran número de reacciones nucleares, y por tanto a una comprensión más clara y profunda de la composición específica de cada elemento, y del núcleo atómico en general. En esta forma, el número de especies radiactivas artificiales producidas llegó aproximadamente a 200 en 1937; a 450 en 1944; a 650 en 1949; a casi 1 000 en 1954, y en la actualidad alcanza más de 1 600. Al menos un isótopo radiactivo o radioisótopo se conoce actualmente para cada elemento en la tabla periódica, y algunos de ellos presentan más de 30, con vidas medias que van desde microsegundos a miles de millones de años. Podemos mencionar aquí que los isótopos de un elemento son especies del mismo, con igual número atómico (numero de protones en el núcleo), pero diferente número de masa (suma de protones y neutrones en el núcleo), de manera que el peso atómico para cada elemento es el promedio del peso de los isótopos que lo forman. Vida media es el lapso en el que cualquier actividad inicial de una especie radiactiva decae a la mitad, y es un valor constante y característico de cada radioisótopo.

Solo 5 meses después de la publicación que daba cuenta de la radiactividad artificial en 1943, Enrico Fermi irradió con neutrones varios elementos, entre ellos, el torio y el uranio, con número atómico de 90 y 92 respectivamente, colocados al final de la tabla periódica conocida entonces. Fermi mencionaba que cuando son irradiados con neutrones, "un gran número de elementos (47 entre 68 examinados hasta entonces) de cualquier peso atómico pueden ser activados" y que en el caso del uranio y el torio "ambos elementos, previamente liberados de impurezas activas ordinarias, pueden ser fuertemente activados por bombardeo con neutrones". Fermi creía haber producido 2 elementos nuevos, con número atómico de 93 y 94, ambos radiactivos, pero cuya curva de decaimiento no acertaba a explicarse, sin haber logrado tampoco separarlos e identificar sus propiedades químicas. Descubrió que los neutrónes lentos, conseguidos al hacer atravesar neutrones en materiales ricos en hidrógeno y carbono, inducían radiactividad más fácilmente al incidir sobre otros elementos.

Otto Hahn y Fritz Strassmann irradiaron uranio con neutrones y encontraron que se producía bario radiactivo, un elemento mucho más ligero con número atómico de solo 56, contra 92 del uranio. En unión de su antigua colaboradora Lise Meitner concluyeron que los núcleos de uranio se dividían al incidir sobre ellos neutrones lentos. Este fenómeno llamado desde entonces "fisión nuclear", produce mas neutrones que los necesarios para desencadenarlo, así como una gran cantidad de energía calorífica como resultado de la transformación en energía de una minúscula masa del núcleo fisionando, según la conocida ecuación de Einstein que relaciona masa y energía. En 1942 Fermi demostró que una cantidad suficiente de uranio llamada masa crítica es capaz de mantener por si misma actos de fisión en forma continua por medio de reacciones en cadena inducidas con los mismos neutrones que se producen, nuevo fenómeno que hoy constituye la base de las modernas pilas atómicas o reactores nucleares que pueden generar energía eléctrica transformando el calor de fisión.

Sin embargo, desde 1939, fecha del descubrimiento de la fisión y del inicio de la 2ª Guerra Mundial, se tenía conciencia de que mediante este fenómeno resultaba posible la liberación instantánea de una gran cantidad de energía, posibilidad que en tiempo de guerra inmediatamente condujo a la idea de crear un arma sin precedente en la historia. El 2 de agosto de 1939, Albert Einstein envió una carta al presidente norteamericano Roosevelt en la que le decía que era posible establecer reacciones nucleares en cadena dentro de una gran masa de uranio, con la cual serían generadas vastas cantidades de energía y grandes volúmenes de elementos similares al radio. Esta carta resultó decisiva para invertir enormes recursos económicos con objeto de poner en marcha el Proyecto Manhattan, después que el reporte de un comité científico lo calificó "practicable e idóneo" para conducir a resultados decisivos en la guerra.

El Proyecto Manhattan, cuyo objetivo era la producción de la bomba atómica, se enfrentaba al problema científico de encontrar si las reacciones en cadena dentro de una masa crítica de uranio podían mantener por sí mismas la fisión de los núcleos, fenómeno de la materia conocido como criticidad, y al problema tecnológico de convertir en cantidades suficientes uranio enriquecido en uranio 235, el isótopo que se fisiona más fácilmente entre los que forman parte del elemento y que representa solo el 0.72% del uranio natural.

El primer problema lo resolvió Fermi en Chicago el 2 de diciembre de 1942.

El enriquecimiento del uranio se logró en 1943, en la planta de Oak Ridge, mediante la combinación de 3 complicados procedimientos fisicoquímicos o difusión gaseosa, difusión térmica y atracción electromagnética. Por otra parte en 1941 se llevaron a cabo experimentos que condujeron al descubrimiento de los elementos intuidos por Fermi, (incluyendo la separación e identificación de sus propiedades), con número atómico de 93 y 94. El elemento 93, descubierto por Edwin Macmillan fue llamado "neptunio" y el 94,

descubierto por Glenn Seaborg fue llamado "plutonio". Ambos elementos fueron separados de los productos de fisión del uranio, y se forman por la captura neutrónica que realiza el uranio-238, seguida de la emisión de una partícula beta para formar el neptunio-239, y la emisión adicional de otra partícula beta para formar al fisionable plutonio-239. Macmillan y Seaborg prepararon 7 elementos artificiales más, con números atómicos del 95 al 101, todos radiactivos, por medio de diversas reacciones nucleares.

Al lograrse el enriquecimiento del uranio y la producción del plutonio-239 en cantidades necesarias, sólo quedaba a Jacob Robert Oppenheimer resolver el problema de como unir violentamente 2 porciones de material fisionable, para constituir la masa crítica y liberar en una pequeña fracción de segundo la energía producida por la fisión de sus núcleos. Por desgracia, Openheimer supo como hacerlo, y el 16 de julio de 1945 a las 5:30 AM explotó el primer artefacto nuclear de prueba, en Almagrado, Nuevo México. Esta bomba fue fabricada con plutonio-239, en tanto que la que explotó en Hiroshima, el 6 de agosto, era de uranio-235 y la de Nagasaki, el 9 de agosto, también fue de plutonio-239. La manufactura de 3 bombas atómicas requirió el esfuerzo de 5 años el trabajo cotidiano de medio millón de personas, y un costo de 2 000 millones de dolares, agregado a 50 años de investigación acerca del fenómeno de la radiactividad.

El mundo de la posguerra no podría ser mas que pesimista, sobre todo en relación con la radiactividad. Desde entonces, varios países han podido construir sus propias armas nucleares. Sin embargo, lo mas significativo es que se ha creado otra bomba aún más terrible, la de fusión, que emplea como detonante un dispositivo de material fisionable para arrojar a 2 porciones de isótopos de hidrógeno (deuterio y tritio) uno contra otro, con tal fuerza que se fusionan formando helio y liberando una cantidad de energía mucho mayor que la originada por la fisión de materiales pesados, y un gran número de neutrones. Ultimamente se ha creado la llamada bomba de neutrones, en la cual el poder explosivo se ha reducido a un mínimo, pero que continúa emitiendo grandes flujos de neutrones durante periodos considerables.

El desarrollo de las ciencias nucleares posterior a la guerra ha logrado importantes avances dentro de los cuales se pueden mencionar las plantas nucleoelectricas que se utilizan para satisfacer la creciente demanda de energia, los radioisotopos usados como trazadores para establecer la funcion de un cierto elemento, material, fluido, parte u organo en un proceso dado, mediante la deteccion de sus radiaciones, la medicion de edades historicas, hidrológicas y geológicas, por el decaimiento de radioisotopos de vida media larga que se encuentran en la naturaleza como, carbono-14, tritio, potasio-40 y rubidio-87 y muchos otros avances.

En nuestro pais, las ciencias de la radiactividad empezaron su desarrollo apenas hace 40 años, cuando los organismos legislativos aprobaron el establecimiento de la Comisión Nacional de Energía Nuclear, con objeto de atender el desarrollo necesario del pais en esta materia.

2. NATURALEZA DE LA RADIATIVIDAD

2.1 RADIACION

La materia se considera radiactiva cuando los núcleos atómicos emiten partículas subnucleares, o radiación electromagnética característica, sin masa ni carga, teniendo lugar un intercambio de energía al mismo tiempo.

El proceso de degradación por el cual los núcleos emiten partículas o rayos, perdiendo masa o pura energía, y convirtiéndose en algún otro elemento en el primer caso o el mismo elemento en otro estado de energía en el segundo, es conocido como decaimiento radiactivo. 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 los núcleos vecinos y también independiente del estado químico de los átomos o de sus condiciones físicas.

Las radiaciones emitidas por el núcleo atómico son de 4 especies principales:

1. *Partículas α* , que consisten en 2 neutrones asociados con 2 protones. Pueden ser considerados como núcleos de átomos de helio. Tienen una masa de 4 u.m.a. (unidad de masa atómica) y 2 cargas positivas. Es importante considerar aquí que la unidad de masa atómica es equivalente a $1/12$ de la masa de ^{12}C , es decir $1.66043 \times 10^{-24}\text{g}$.

Si un núcleo atómico es radiactivo y emite una partícula α , pierde 2 unidades en carga y 4 unidades de masa. Este átomo se convierte en otro elemento, con número atómico menor (disminuido en 2 unidades) y número de masa menor (disminuido en 4 unidades). Esto significa que los elementos radiactivos que decaen por la emisión de partículas α , el núclido hijo pasa a ocupar un sitio 2 lugares a la izquierda y dos líneas abajo de la colocación original en la tabla periódica de los elementos.

2. Partículas β son partículas de masa despreciable y presentan carga negativa o positiva. La partícula β^- o negatrón es un electrón emitido por el núcleo, el cual aumenta 1 unidad su carga positiva, al transformar un neutrón en protón. Por tanto, el número atómico aumenta 1 unidad, el átomo se convierte en el elemento situado 1 lugar a la izquierda y hacia arriba en la tabla periódica y su número de masa permanece sensiblemente igual. La partícula β^+ 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. El número atómico decrece 1 unidad y el elemento resultante se corre un lugar a la derecha y hacia abajo de la tabla periódica.

3. Los neutrones son partículas sin carga teniendo una masa de aproximadamente 1 u.m.a.. Por tanto, los núcleos perdiendo neutrones no cambian su número atómico, pero su número de masa disminuye 1 unidad por cada neutrón emitido. La emisión de neutrones se produce durante los eventos de fisión nuclear de metales pesados o por reacciones características.

4. Los rayos γ son radiaciones electromagnéticas, similares a los rayos X, ondas de radio o la luz, pero con mucho menor longitud de onda y en consecuencia mucho mayor energía. Los rayos γ , al igual que los rayos X, tienen energías bien definidas ya que son producidos por la transición entre niveles de energía del átomo, pero mientras los rayos γ son emitidos por el núcleo, los rayos X resultan de las transiciones de energía de los electrones fuera del núcleo u orbitales. Los rayos γ son a menudo llamados fotones, cuando se consideran como paquetes de energía con valor constante, emitidos por un núcleo radiactivo al decaer.

Existen en gran número otras partículas subnucleares interesantes tales como neutrinos, anti-neutrinos y mesones.

2.1.1 TIPOS DE DECAIMIENTO RADIOACTIVO

En general, sólo los elementos con un número atómico mayor a 82 emiten partículas α para conseguir su estabilidad. Por ejemplo:



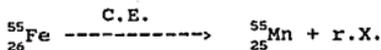
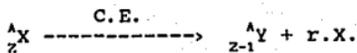
Los núclidos que se encuentran a la derecha de la curva de estabilidad, es decir, con exceso de neutrones, tienden a emitir partículas β^- o negatrones, convirtiendo neutrones en protones para aproximarse al valor N/Z que les confiere estabilidad. Por ejemplo:



Del mismo modo, los núclidos que se encuentran a la izquierda de la curva de estabilidad, es decir, con un exceso de protones, tienden a emitir partículas β^+ o positrones, convirtiendo protones en neutrones para aproximarse al valor N/Z que les proporciona estabilidad. Por ejemplo:



Pero puede suceder también que un protón en exceso tome un electrón orbital, usualmente en la capa K, la más próxima al núcleo, para transformarse, disminuyendo en una unidad el número atómico Z . Este proceso, llamado captura electrónica, va acompañado de la emisión de rayos X y se designa por las iniciales C.E. o la letra griega ϵ . Por ejemplo:



De este modo, para núclidos que se encuentran a la izquierda de la curva de estabilidad, puede tener lugar emisión de positrones o captura electrónica, dependiendo de la energía disponible para la transmutación nuclear. Durante la captura electrónica, la órbita vacía se ocupa por un electrón de una órbita exterior, lo que da lugar a la emisión de un rayo X, siendo la única indicación externa de que esta transformación ha tenido lugar.

Es llamado transición isomérica el proceso por el cual un núclido emite un rayo γ , permaneciendo con iguales número atómico y de masa, pero en un nivel inferior de energía. Se designa con las iniciales T.I.. Por este proceso, el núclido tiende a la estabilidad valiéndose de un reacomodo de las partículas subnucleares, cambiando así su nivel de energía. Los núclidos que se encuentran en un estado de excitación y necesitan emitir energía en forma de radiación γ para alcanzar su estabilidad, son llamados núclidos en estado metaestable, condición que se indica con la letra m al lado del número de masa. Por ejemplo:



Ha sido encontrado, que tanto un rayo X como un γ pueden interaccionar con un electrón orbital, comunicándole su energía y lanzándolo del átomo, con lo cual se emite un electrón en vez de una radiación electromagnética. Este evento puede tener lugar entre un rayo X y cualquier electrón orbital, o entre un rayo γ y usualmente un electrón de las capas K o L. Este proceso es llamado conversión interna y los electrones lanzados de esta manera se identifican como electrones Auger o electrones por conversión, según hayan sido lanzados por un rayo X o γ , respectivamente. La

notación para designarlos es usualmente el simbolo e^- , para distinguirlos de las partículas β^- . Los electrones Auger y por conversión difieren de las partículas β^- en que son monoenergéticos, al disponer de la energía correspondiente a la diferencia entre la energía del rayo incidente y la energía de amarre del electrón lanzado. Las partículas β^- no son monoenergéticas.

2.2 TIEMPOS DE VIDA MEDIA

2.2.1 TIEMPO DE VIDA MEDIA RADIATIVA ($t_{1/2}$)

Es el tiempo necesario para que la actividad inicial de un elemento radiactivo decaiga a la mitad. Es decir:

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

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

$$\ln A_0/A = \lambda t$$

$$\ln A_0/(A_0/2) = \lambda t$$

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

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

donde λ es la constante de desintegración o decaimiento radiactivo. Es constante para cada elemento.

2.2.2 TIEMPO DE VIDA MEDIA BIOLÓGICA ($t_{1/2 b}$)

Es el tiempo necesario para que el organismo elimine la mitad de la cantidad suministrada de cualquier sustancia radiactiva:

$$t_{1/2 b} = \ln 2 / \lambda_b$$

donde λ_b es la constante de decaimiento biológico.

2.2.3 TIEMPO DE VIDA MEDIA EFECTIVA ($t_{1/2 ef}$)

Es el tiempo necesario para que la cantidad de un elemento radiactivo fijado en algún tejido del cuerpo, disminuya a la mitad de su cantidad original, como resultado combinado del decaimiento radiactivo ($t_{1/2}$) y la eliminación biológica ($t_{1/2b}$):

$$t_{1/2 ef} = (t_{1/2})(t_{1/2b}) / (t_{1/2} + t_{1/2b})$$

Las unidades de tiempo de vida media son las siguientes:

y = años d = días h = horas m = minutos

s = segundos ms = milisegundos μ s = microsegundos

Algunos ejemplos de $t_{1/2}$, $t_{1/2 b}$ y $t_{1/2 ef}$ en algunos radioisótopos son los siguientes:

Radioisótopo	$t_{1/2}$	$t_{1/2 b}$	$t_{1/2 ef}$
H ³	12.26 y	12 d	12.0 d
C ¹⁴	5,600.0 y	10 d	10.0 d
P ³²	14.45 d	257 d	14.1 d
I ¹³¹	8.05 d	138 d	7.6 d
etc.			

ORGANO CRITICO: Se llama así el tejido u órgano del cuerpo, hacia el cual los elementos inertes o radiactivos muestran cierta selectividad o preferencia. La preferencia es por afinidad química, no física.

Algunos ejemplos de organos críticos de varios elementos:

Organo crítico	Núclido
Tiroides	I ₂
Músculos	Cs, K
Riñones	U, Cd, Hg
Sangre	Fe, Cr
Cerebro	P
Huesos	Ra, Ca, Sr, Ba
Hígado	Mn, Co
Suprarenal	Cu

2.3 UNIDADES

La unidad de masa atómica unificada (uma) es 1/12 de la masa del carbono (¹²C).

$$1 \text{ uma} = 1.66043 \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$1 \text{ eV} = 1.07356 \times 10^{-9} \text{ uma}$$

Un electrón volt (eV) es la energía adquirida por un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de 1 volt.

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

Las unidades de la actividad son:

Becquerel (Bq)

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps (desintegración por segundo) (SI)}$$

Rutherford (Rd)

$$1 \text{ Rd} = 10^6 \text{ dps (unidad de poco uso)}$$

Curie (Ci)

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

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

$$1 \text{ Ci} = 2.22 \times 10^{12} \text{ dpm (desintegraciones por minuto)}$$

La Dosis Absorbida para cualquier radiación ionizante es la energía depositada por la radiación por unidad de masa en cualquier medio, las unidades son las siguientes:

Gray (Gy)

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$$

La unidad para Dosis Equivalente se utiliza en función de la unidad de medida utilizada para la dosis absorbida es decir, si se utilizó el (Gy) la unidad será el Sievert (Sv), en cambio si se utilizó el (rad) la unidad será el (rem). La Dosis Equivalente (H) resulta cuando se pondera la Dosis Absorbida por el factor de calidad del tipo de radiación y otros factores modificantes.

$$H = D \cdot Q \cdot N$$

Cuando la dosis equivalente es pesada apropiadamente, de acuerdo a la susceptibilidad o sensibilidad de los diferentes

tejidos, se obtiene la Dosis Equivalente Efectiva cuya unidad también es el Sievert (Sv).

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/Kg}$$

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

En el caso de la dosis de exposición la unidad utilizada es el Roentgen (R), que se define como la intensidad de radiación x o γ capaz de producir una unidad de cantidad de electricidad de cualquier signo en 0.001293 g de aire (1 cm³ a condiciones normales de presión y temperatura), lo cual equivale a la absorción de 87.7 ergios/g de aire. Por definición se limita a la radiación electromagnética (x o γ) y sirve para medir la intensidad de radiación en un espacio dado, pero no la dosis absorbida por un material cualquiera.

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ coulombios/Kg}$$

2.4 RADIATIVIDAD NATURAL

Cerca de 1/3 de los 90 elementos que existen en la tierra tienen algún isótopo radiactivo. Todos los elementos transuránidos son radiactivos, lo que sube esta proporción a cerca de 1/2 de todos los elementos conocidos.

La radioactividad ha estado presente en la tierra desde que ésta se formó. Las fuentes de radiación natural pueden clasificarse en :

a) Radioisótopos formados por la producción continua de reacciones nucleares originadas por la radiación cósmica al interactuar con la atmósfera (³H, ¹⁴C).

b) Radioisótopos de vida media muy larga (10^8 , 10^9 años) que entraron a formar parte de la mezcla isotópica del elemento desde su origen (^{40}K , ^{87}Rb).

c) Radioisótopos formados por el decaimiento de otro radioisótopo (cadenas radiactivas) (^{226}Ra , ^{222}Rn).

La mayoría de los elementos radiactivos se encuentran en la naturaleza como minerales en pequeñas concentraciones y por tanto están presentes en los materiales de construcción, presentando el fenómeno de decaimiento, hasta llegar al elemento estable.

La radiación formada por el cosmos está compuesta por protones en un 70%, partículas α en un 20%, iones de Li, de Be y de B en 0.7%, iones de C, de N y de O en 1.7% , 0.6% de iones con número atómico mayor de 10 y neutrones, rayos γ y electrones en muy pequeña proporción.

El agua de lluvia se estima que en promedio tiene una actividad natural de 80 p Ci/l, el agua potable una actividad natural de 10^{-9} a 10^{-10} μ Ci/ml y en el aire se "respira" una actividad de 5 p Ci/m³ por gases radiactivos (Xe, Kr, Rn, I).

Por cada gramo de basura son emitidos alrededor de 6 dpm provenientes sólo del C^{14} y en el año de 1970 en U.S.A. se calculó que se desecharon 1.8×10^9 toneladas de basura, es decir un equivalente de aprox. 1.8×10^{16} dpm y, por supuesto, esta cantidad ha aumentado año con año.

La radiactividad natural estimada en USA en 1960 para diferentes alimentos es la siguiente:

ALIMENTO	PCi/kg por Ra ²²⁶	PCi/kg por K ⁴⁰
Frijol seco	6.1	800 a 4640
Huevos	4.1	840
Pan	3.2	
Harina	2.7	
Jugo de frutas	1.6	
Vegetal envasado	2.2	
Macarrón	2.1	
Papas	2.0	
Vegetal fresco	2.4	910 a 4540
Arroz	1.5	
Peces	1.2	925 a 4540
Pollo	0.75	
Fruta fresca	0.37	620 a 3700
Carnes	0.44	2740 a 3320
Tomates	0.37	1900
Leche	0.25	770 a 1510
Nueces		3500 a 6400
Bebida de cola		430
Cerveza		390
Azúcar - Café		1900

Se recibe radiación por ver la TV, por portar reloj con carátula luminosa (contiene sales de Ra²²⁶) y por muchos otros medios.

EJEMPLOS DE NIVELES DE RADIONUCLEIDOS NATURALES PRESENTES EN LOS PRODUCTOS ALIMENTICIOS, EN EL HOMBRE Y EN EL MEDIO AMBIENTE

Leche (de potasio-40)	50 Bq/litro
Whiskey	50 Bq/litro
Pescado (de potasio-40)	100 Bq/kg
Papas	100-150 Bq/kg
Aceite de cocina	180 Bq/kg
Agua de mar (de potasio-40)	12 000 Bq/m ³
Ingestión humana de potasio-40 en los alimentos	100 Bq/día
Ingestión humana de carbono-14 en los alimentos	100 Bq/día
Cantidad de radiactividad natural incorporada en el organismo adulto	5 000 Bq
Cantidad calculada de radiactividad (de cesio 137) que debe ingerir un individuo para alcanzar el nivel de intervención de 5 mSv	400 000 Bq

* Las cifras citadas son valores medios

NOTA: El Cs-137 y el K-40 natural (presentes en todos los organismos vivos) tienen radiotoxicidad comparable.
Boletín OIEA, 1988

2.5 RADIATIVIDAD ARTIFICIAL

Para detectar los radionúclidos en alimentos, es necesario conocer, además de los radionúclidos que se encuentran en forma natural en el medio ambiente cuáles son los radionúclidos que el hombre ha introducido artificialmente.

Un núclido puede ser transformado en otro (fenómeno que se conoce como transmutación), cuando es bombardeado con partículas cargadas o fotones. Este proceso es importante por cuanto el

núcleo producto de la reacción puede ser radiactivo y las partículas secundarias expulsadas dan lugar a otras reacciones.

Las fases inicial, intermedia y final de una reacción nuclear típica, implican 5 componentes, que son: proyectil, núcleo blanco, núcleo compuesto excitado, núcleo resultante y radiación emitida durante la reacción.

Las partículas α o β , fotones γ , protones o deuterones, que tienen su origen en la fisión, fusión, desintegración radiactiva, aceleradores de partículas o transmutaciones, actúan como proyectiles. El núcleo original (blanco) puede ser cualquiera, desde el átomo más liviano que es el hidrógeno, hasta uno de los más pesados como el uranio. El núcleo compuesto encierra el núcleo original más la partícula proyectil. La desintegración del núcleo compuesto se diferencia de la desintegración radiactiva en que el tiempo de vida del núcleo compuesto es extremadamente corto y además porque los protones no son convertidos en neutrones y éstos no son convertidos en protones durante el proceso de transformación.

El núcleo producto es el que se forma como resultado de la disociación del núcleo compuesto y la partícula producto puede ser cualquiera de las partículas subatómicas. Durante la reacción pueden expulsarse una o más partículas.

La interacción nuclear depende de la naturaleza del proyectil, su energía y del material que está siendo bombardeado. En la mayoría de las reacciones nucleares pueden aplicarse 3 leyes que involucran cambios de energía menores que unos cuantos Mev:

- a) Conservación del número másico
- b) Conservación del número atómico
- c) Conservación de la energía

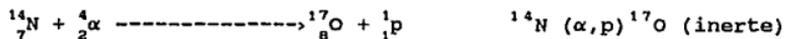
Estas leyes simplifican la escritura de reacciones y predicen los productos posibles.

Dependiendo de la energía de la partícula proyectil y su probabilidad de interacción con un núcleo blanco, las reacciones nucleares pueden clasificarse de varios modos. Estas reacciones son generales y no puede suponerse que ocurran con cualquier núcleo particular.

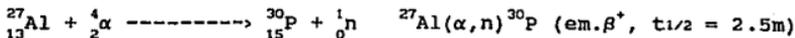
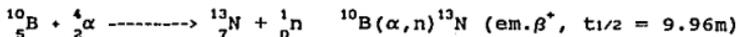
1. Reacciones inducidas por protones
2. Reacciones inducidas por deuterones
3. Reacciones inducidas por alfas
4. Reacciones inducidas por electrones (partículas beta)
5. Reacciones inducidas por los fotones

Los radioisótopos artificiales o sintéticos de los elementos se obtienen a través de reacciones nucleares, las que podemos definir como la interacción de un núcleo con otro, una partícula subnuclear o un rayo γ , para producir un núcleo compuesto que dura un tiempo del orden de 10^{-14} s, el cual emite una radiación y queda convertido en el núcleo producto de la reacción, que en gran número de casos es radiactivo.

Rutherford (1919) transmutó Nitrógeno en Oxígeno al irradiarlo con partículas α provenientes del Polonio:



Joliot-Curie (1934) descubrieron la radiactividad artificial al irradiar Boro y Aluminio con partículas α :



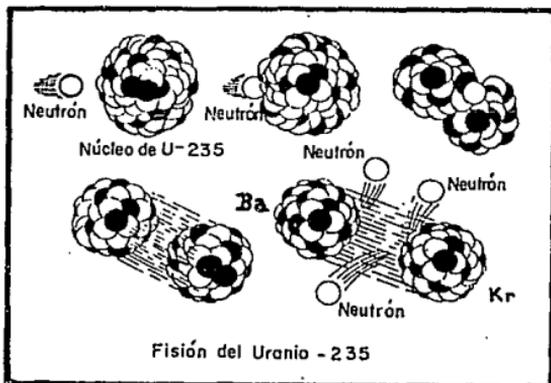
2.6 FISION Y FUSION

Por fisión se entiende la ruptura del núcleo de un elemento pesado en cuando menos dos fragmentos, con la simultánea emisión de neutrones y raras veces con la emisión de partículas α . La fisión ha sido producida en algunos núclidos pesados (notablemente U-235, U-238 y Th-232) por irradiación con neutrones, protones, deuterones, partículas α y rayos γ de alta energía. Más recientemente se ha encontrado que elementos tales como tantalio, platino, talio, plomo y bismuto, sufren fisión cuando son irradiados con deuterones de 200 MeV y partículas α de 400 MeV. Por mucho, la más importante y común resulta la fisión inducida con neutrones. El U-235 y Pu-239 pueden ser fisionados por neutrones térmicos o rápidos, mientras que la fisión del Th-232, Pa-231 y U-238 presenta mayor probabilidad de ocurrencia con neutrones rápidos. Existen también radioisótopos de gran número de masa cuya inestabilidad se manifiesta por medio de la fisión espontánea, tales como el Cf-252 y el Fm-256.

La repartición de la masa de un núcleo pesado en 2 partes, con la simultánea emisión de neutrones y rara vez de partículas α , puede ocurrir de muy diversas maneras y son conocidos un gran número de productos de fisión. Así por ejemplo, en el caso de la fisión del U-235 con neutrones lentos, se encuentran productos que van desde un número de masa 72 hasta 158, y desde un número

atómico de 30 correspondiente al zinc hasta un número atómico de 63 correspondiente al europio. Debido a que el número de neutrones requeridos para la estabilidad es mucho más grande en la región de los elementos pesados que en la región de los productos de fisión, cuando éstos son producidos presentan un exceso de neutrones en relación a los isótopos estables de los mismos elementos, razón por la cual tienden a la estabilidad por medio de sucesivos decaimientos β^- , que también corresponden a diversos estados de excitación y la consecuente emisión de rayos γ .

Fisión del U-235 con neutrónes:



El proceso de fusión se conoce también como reacción termonuclear. Al calentar materiales de bajo número atómico tales como el deuterio y el tritio a temperaturas del orden de los millones de grados centígrados, es posible obtener productos de fusión como el helio y neutrones, acompañados con el desprendimiento de cantidades enormes de energía.

Mientras que la fisión completa de una libra de uranio o plutonio puede producir una energía equivalente a 9,000 toneladas de TNT, la fusión de una libra de deuterio liberará energía equivalente a 26,000 toneladas de TNT, cantidad casi 3 veces mayor que la obtenida por el proceso de fisión. Al combinarse en forma adecuada el deuterio y tritio bajo la acción de una bomba térmica es posible crear una bomba de hidrógeno o arma nuclear de fusión. Durante este proceso el principal contaminante es el TRITIO.

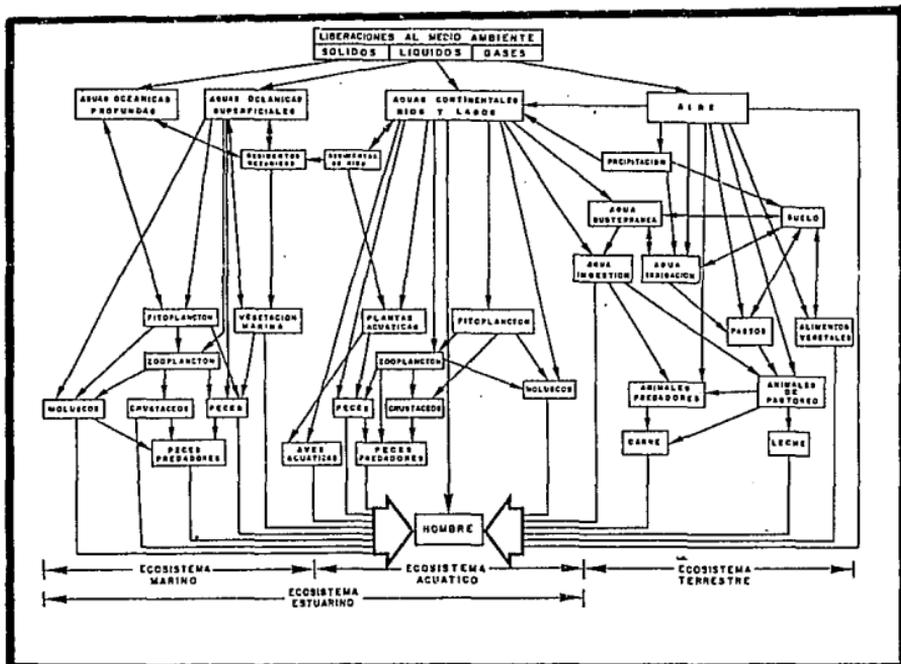
2.7 REACTORES NUCLEARES

El evento especial ocurrido en una pila o reactor nuclear, es la fisión del U-235 inducida por neutrones, con la consecuente producción de calor y mayor número de neutrones que los utilizados para ocasionar la fisión inicial, los cuales originan una reacción en cadena mantenida por si misma, estado del combustible nuclear conocido como *criticidad*. En los reactores nucleares de potencia, el calor se usa para originar vapor de agua, cuya presión mueve turbinas capaces de generar energía eléctrica. En los llamados reactores de investigación, al tener una mucho menor cantidad de combustible, el calor de fisión producido es también mucho menor, por lo que permite su disipación sin utilizarlo, pero en cambio los neutrones en exceso a los necesarios para mantener la criticidad o neutrones libres, son empleados para producir radioisótopos y efectuar estudios de física de neutrones. Un reactor nuclear de investigación, tal como el Triga Mark III del Centro Nuclear de México, que usa agua común como moderador, resulta capaz de producir flujos de orden de 10^{13} n/cm²s.

3. VIAS POR LAS QUE LOS CONTAMINANTES RADIOACTIVOS LLEGAN A LOS ALIMENTOS Y ALCANZAN AL HOMBRE

Los radionucleidos descargados al ambiente pueden producir exposiciones del hombre a la radiación a través de una gran variedad de mecanismos. Materiales radiactivos presentes en el aire, agua y alimentos son ingeridos o inhalados e introducidos en el organismo. Algunos de estos materiales pueden ser incorporados en tejidos y órganos, produciendo dosis de radiación interna. También se pueden recibir dosis de radiación externa por la emisión de radiación beta y gamma provenientes de radionucleidos presentes en el aire, agua o suelo.

RUTAS MEDIANTE LAS CUALES LOS RADIONUCLEIDOS PUEDEN LLEGAR AL HOMBRE



En la figura anterior se muestra un diagrama simplificado de las rutas mediante las cuales los radionucleidos liberados al ambiente pueden alcanzar al hombre, a estas posibles vías se les llama rutas de exposición. Como se puede observar estas pueden ser numerosas y variadas. En algunos casos estas pueden ser relativamente simples, como la inhalación e inmersión en agua. En otros casos son complejas e involucran un proceso de varias etapas, como el caso de la ingestión de peces y mariscos donde los radionucleidos originalmente liberados experimentan una dilución en el agua (en un río o en el mar), posteriormente pueden pasar al sedimento, pasar por varios substratos del ecosistema acuático (cadenas tróficas) y finalmente los peces y mariscos pueden ser consumidos por el hombre.

El primer proceso que experimentan los radionucleidos al ser liberados al medio, es un proceso de dilución o dispersión el cual invariablemente produce una disminución en la concentración del radionucleido en el medio.

Para el caso del medio acuático existen dos modelos de dilución que nos permiten predecir en campos cercanos y lejanos, las concentraciones de radionucleidos en el agua a partir de una determinada fuente de liberación; estos modelos dependen en gran medida del ecosistema en donde se efectúe la descarga y si ésta es intermitente, continua o accidental.

Después de la dilución inicial, los radionucleidos en el medio pueden sufrir reconcentración por procesos químicos o biológicos de forma que la concentración de un radionúclido en un medio determinado puede ser mayor que la del medio primario e incluso mayor que el de la fuente de emisión, a este proceso se le conoce como *bioacumulación*, aún cuando se reconozca que en algunos casos este proceso no sea eminentemente biológico.

3.1 ECOSISTEMA

Un ecosistema es la combinación del medio ambiente físico, químico, abiótico y el conjunto de organismos bióticos que se

combinan para formar un sistema interrelacionado e interdependiente llamado sistema ecológico o ecosistema. Esta interdependencia entre los componentes vivos y no vivos es un concepto importante para la comprensión del efecto de las acciones del hombre sobre su medio ambiente y para la descripción de los procesos del transporte de radionucleidos.

En la figura se muestra que existen tres tipos de ecosistemas o medios primarios que se pueden usar para establecer una clasificación natural de las rutas de exposición: terrestre, acuático (agua dulce) y el marino (agua salada). Existe un cuarto ecosistema que es el estuario que presenta características combinadas de los ecosistemas de agua dulce y salada.

Las rutas de exposición se pueden analizar separadamente agrupándolas de acuerdo a estos ecosistemas. Sin embargo esta clasificación (terrestre y acuática) es meramente artificial ya que existen rutas que comprenden varios ecosistemas. Por ejemplo el agua de un río que contiene radionucleidos, puede usarse para irrigación y por lo tanto pasar al ecosistema terrestre, de forma similar, radionucleidos originalmente depositados en el suelo, pueden ser lavados por lluvia, ser transportados a los ríos, pasar a través de un estuario y eventualmente ser depositados en los lagos, mares y océanos.

TIPOS DE RUTAS DE EXPOSICION

Las rutas de exposición también se pueden clasificar en función de su relación temporal entre la concentración de radionucleidos en el medio ambiente y la velocidad de liberación de la fuente.

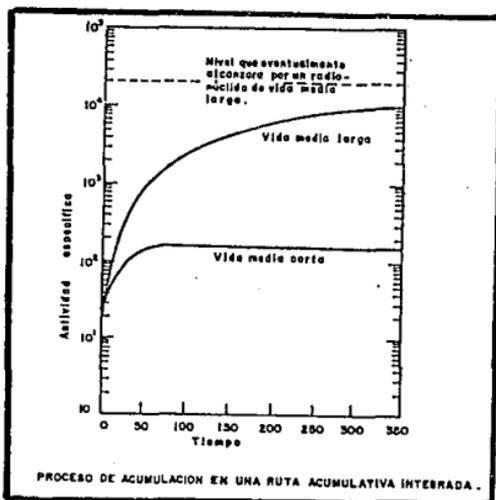
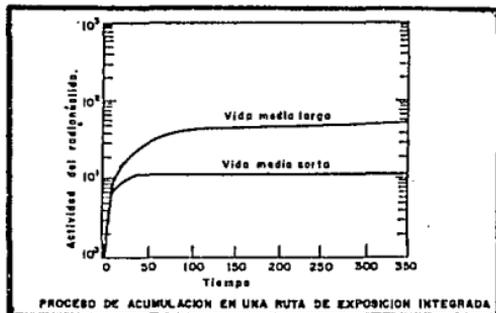
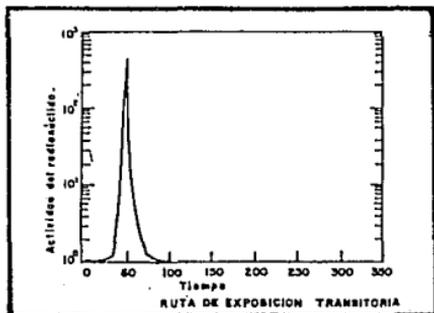
En base a esta relación, se puede identificar tres tipos de rutas: a) Rutas de exposición transitoria, b) Rutas de exposición integradas y c) Rutas de exposición acumulativas-integradas.

Una ruta de exposición transitoria es aquella donde la concentración de radionucleidos es directamente proporcional a la velocidad de liberación de la fuente, es decir, la concentración

de un radionucleido en un substrato del medio ambiente persistirá en el tiempo que dure la liberación. El ejemplo de este tipo de ruta es la exposición por inmersión (pescadores o bañistas) en un río donde accidentalmente se ha vertido un tanque que contenía materiales radiactivos, la concentración en el agua del río en un determinado punto, aguas abajo, permanecerá únicamente un determinado tiempo, que es proporcional al tiempo que duró la liberación.

En una ruta de exposición integrada la concentración en un medio aumenta con la liberación continúa de materiales radiactivos y puede persistir tiempo después de cesada la liberación, especialmente si se trata de radionucleidos de vida media larga, si la liberación continúa eventualmente alcanzará una concentración de equilibrio. Un ejemplo simple puede ser la concentración en sedimentos o agua de un lago donde se está vertiendo una cantidad más o menos constante de material radiactivo, la concentración en el agua alcanzará el equilibrio y persistirá durante un tiempo, aún cuando se suspendiera la liberación.

La ruta de exposición acumulativa-integrada involucra un segundo proceso de integración y siempre está basada en la concentración resultante de una ruta de exposición integrada. La concentración de un radionucleido en un substrato del medio no dependerá de la duración de la liberación sino de la concentración del medio que la rodea o de donde se nutre. Un ejemplo es la concentración de un radionucleido en un pez o en una almeja que vive en el lago propuesto en el ejemplo anterior. En este caso las concentraciones en el pez pueden ser mucho mayores, dependiendo del factor de bioacumulación, que las concentraciones en el agua del lago. En la figura siguiente se pueden observar las concentraciones para estas rutas.



La importancia de esta clasificación radica en que sirva de paso para el muestreo requerido por un programa de vigilancia ambiental o de alimentos producidos en una determinada región, así una ruta de exposición transitoria requerirá un monitoreo continuo, debido a su alta variabilidad en el tiempo, una ruta de exposición acumulativa es menos variable en el tiempo y requerirá un muestreo menos frecuente. En los substratos de las rutas acumulativas-integradas, donde las concentraciones prácticamente son independientes de la velocidad de liberación, los muestreos pueden ser de baja frecuencia.

3.1.1 ECOSISTEMA TERRESTRE (TRANSPORTE DE RADIONUCLIDOS EN LA ATMOSFERA)

Además de los elementos radiactivos de origen natural que contaminan la biósfera, (aquellos que llegan sin la intervención humana), existen materiales radiactivos tanto naturales como artificiales que llegaron a ella por las actividades humanas. De estas, las actividades energéticas e industriales, además de la detonación de artefactos nucleares han contribuido en mayor medida a la reactividad de origen no natural que existe en la biósfera.

El ciclo de la contaminación por vías atmosféricas comprende tres fases:

- a) Liberación del material radioactivo a la atmósfera (Término fuente)
- b) El transporte y difusión del material a la atmósfera.
- c) La precipitación del material en la superficie (tierras o aguas)

La forma y cantidad del material liberado, así como los fenómenos atmosféricos, determinan no solo la magnitud de la dosis que la población pueda recibir, sino también la extensión de la contaminación.

Los radionúclidos liberados en el aire pueden provenir de diferentes fuentes: Usos industriales de radioisótopos, accidentes de plantas nucleares, centros de investigación y hospitales que utilizan materiales radiactivos y fundamentalmente, detonaciones de armamentos nucleares en la atmósfera. Para la elección de sitios, diseño y operación de centros y plantas que contienen o utilizan grandes cantidades de material radiactivo se toman en consideración los aspectos meteorológicos relacionados con la difusión atmosférica. Los procesos de difusión posteriores a una liberación así como las subsecuentes exposiciones son siempre dependientes de los fenómenos atmosféricos.

Para efectos de difusión de contaminantes, se puede considerar que los procesos meteorológicos más importantes se realizan a escala sinóptica y a escala local

La meteorología a escala sinóptica está relacionada con el comportamiento de los patrones generales de circulación de la atmósfera, el movimiento de las grandes masas de aire y los sistemas climáticos que son los responsables de la variación diaria del clima. Estos son patrones de gran escala que controlan en gran medida los fenómenos climáticos locales y la distribución mundial de los radionúclidos liberados en explosiones nucleares realizadas en la atmósfera y durante accidentes en plantas nucleares.

La liberación de materiales radiactivos en la atmósfera puede producir dosis de radiación por diferentes rutas:

- a) Exposiciones externas por inmersión en la pluma^{*}, exposición a la pluma o por exposición a superficies en donde se ha depositado material radiactivo ...y
- b) Exposiciones internas por inhalación del aire contaminado o por ingestión de agua y alimentos contaminados.

* pluma se considera una nube pequeña que contiene materiales radiactivos

A la combinación de los fenómenos de difusión y transporte se le conoce como dispersión. A medida que la pluma se dispersa pueden ocurrir mecanismos que afectan la concentración del material en la pluma, por ejemplo, bajo ciertas condiciones las partículas de un efluente pueden verse involucradas en la formación de un fenómeno de precipitación dentro de una nube y ser arrastradas por la lluvia en el momento de la precipitación. A este proceso se le conoce como "rainout" o "depleción por lluvia" en tanto que la remoción del material debido al arrastre de este al pasar la pluma por un sitio lluvioso se le conoce como "washout" o "depósito húmedo". Los materiales de la pluma también pueden ser removidos por efectos gravitacionales, esto es especialmente cierto y evidente para efluentes con partículas de tamaños apreciables o por contacto de la pluma con el suelo, la vegetación u otras superficies. A este mecanismo de remoción se le conoce como "depósito seco". El material radiactivo también puede decaer durante el transporte o sufrir transformaciones químicas durante el mismo.

TRANSFERENCIA DE RADIONUCLEIDOS EN MEDIO TERRESTRE

La transferencia de los radionucleidos a los productos alimenticios en medio terrestre es muy compleja, se efectúa bajo la acción de numerosos procesos que dependen de las características del medio ambiente y de las condiciones en las cuales se efectúe la contaminación.

Los más importantes de ellos son: la migración en la tierra, la transferencia del suelo a la planta y la transferencia de la planta al animal. Cada uno hace intervenir diferentes mecanismos. La diversidad de rutas y de mecanismos que intervienen ha conducido a representar los movimientos de los radionucleidos en el medio ambiente terrestre con la ayuda de un modelo de compartimentos.

El número de productos que pueden ser consumidos por el hombre es considerable de modo que se han agrupado en un cierto número de categorías. La selección de estas categorías ha sido efectuada

teniendo en cuenta los componentes del régimen alimenticio, medio de la población de la comunidad y la similitud de los principales mecanismos de contaminación.

La evaluación de la transferencia en las cadenas biológicas, de los elementos radiactivos descargados de manera controlada en el medio ambiente, o emitidos en una situación accidental es un elemento importante para la protección del público.

A partir de estudios teóricos, notablemente en materia de modelización, de estudios experimentales de tipo radio-ecológico y de observaciones en su verdadera magnitud, ha sido posible construir un conjunto, siempre perfeccionable, pero suficiente para alcanzar con una buena precisión el objetivo, es decir, la evaluación provisional de las consecuencias radiológicas de las emisiones.

El ecosistema terrestre es el más importante de los ecosistemas mencionados, en lo referente a las contribuciones a la exposición del hombre, debido no solo a que el hombre reside en él, si no que también la porción más importante de sus alimentos la obtiene de él. Además los materiales radioactivos pueden entrar al ecosistema terrestre por varias vías de la atmósfera, debido al depósito del agua por la irrigación, por contaminación de aguas subterráneas o superficiales por depósito.

Algunas de las rutas de exposición del ecosistema terrestre no involucran procesos de bioacumulación, a éstos se les conoce como rutas de exposición directas y son generalmente del tipo transitorio, por ejemplo la inhalación, la exposición a superficies y la inmersión dentro de una pluma que contiene radiocucleidos.

RUTA: Aire ---> Depósito en vegetales ---> Ingestión por el hombre ---> Irradiación interna.

Los efluentes aéreos al ser liberados a la atmósfera pueden alcanzar la superficie del suelo y depositarse sobre él ó sobre los vegetales.

Entre los radioisótopos del término fuente, el único que puede ser importante por esta vía es el I-131 por su vida relativamente larga, ya que se deposita y se adsorbe sobre vegetales de hoja ancha que se ingieren directamente, como lechuga, verdolaga y verduras.

En cuanto a los radionucleidos liberados en forma de partículas, también pueden depositarse en vegetales apareciendo en frutas, granos y semillas, produciendo la dosis correspondiente por irradiación interna.

Esta acumulación también se realiza en raíces que toman los radionucleidos del suelo.

El monitoreo tiene por objeto evaluar las concentraciones de radioyodos en vegetales de hoja ancha que se ingieren directamente y las concentraciones de radionucleidos liberados en forma de partículas en los demás productos agrícolas de la región.

En las estaciones de muestreo se eligen diferentes puntos donde se esperan los máximos y mínimos promedios anuales de depósito de radioyodos y partículas.

En este tipo de muestreo es conveniente realizarlos semestralmente, generalmente en época de temporada del vegetal o por temporada de secas y lluvias.

Para el monitoreo de la ruta debido al depósito sobre el suelo o sobre vegetales, absorción por raíces o partes aéreas y retención de radionucleidos en las partes comestibles de productos agrícolas de la región a estudiar, generalmente son el maíz, frijol, tomate, caña de azúcar, papaya y el mango como sustrato de muestreo, puede haber otros cultivos representativos de la región a estudiar.

El muestreo de estos productos se realiza en la zona de cultivo directamente con los productores durante la cosecha, de la parte que los productores guardan para autoconsumo.

Aunque el muestreo de algunos productos alimenticios no es constante, representado variaciones tanto temporales como en función de las fluctuaciones del mercado y de la rotación de cultivos, haciendo difícil fijar en forma definitiva estaciones y frecuencias de muestreo y las estaciones de muestreo que se tengan sólo representan una experiencia adquirida durante un cierto tiempo (generalmente un año) quedando sujetas a reubicación.

La concentración en vegetales de radionucleidos depende fundamentalmente de la capacidad que tenga el vegetal considerado para absorber y eliminar el radionucleido a partir del depósito del mismo en las hojas a través del suelo. Los radionucleidos de mayor importancia son los siguientes: Sr-89, Sr-90, Zr-95, Ru-106, I-131, Cs-134, Cs-137, Ce-141, Ce-144.

RUTA: Aire ---> Depósito en plantas forrajeras ---> Ingestión por animales ---> Ingestión por el hombre de productos animales ---> Irradiación interna.

Los radioyodos y partículas presentes en los efluentes aéreos pueden depositarse sobre el pasto que al ser ingerido por animales como vacas y cabras, los metabolizan y aparecen en sus productos o secreciones (como carne y leche) que al ser ingeridos por el hombre, le producen una irradiación interna. Los radioyodos más importantes para esta ruta son el I-131 y el I-133.

De los radionucleidos liberados en forma de partículas, los únicos que pudieran contribuir a la dosis por ingestión de productos de origen animal son, el Cs-137, Cs-134, Sr-89, Sr-90, Ba-140 y Zr-95, cuya vida media es larga y se absorben en el tracto gastrointestinal.

Los principales productos de origen animal y que forman parte de la cadena alimenticia vegetal ---> animal ---> producto, son la leche, la carne de res, el pollo y el huevo.

La ruta crítica de exposición, será la ruta: aire ---> pasto ---> vaca ---> leche, el radionucleido crítico es el I-131, el órgano crítico: tiroides y el grupo de edad crítico: niños. Parte de la leche se consume de inmediato de forma "Bronca".

El monitoreo de la leche que se produce y consume, deberá proporcionar bases reales y directas de la evaluación de dosis tanto al individuo como a la población y es crítico para vigilar que no se rebasen los límites de dosis establecidos.

En lo referente a carne de res, su contribución a la dosis del individuo y de población es menor que la leche, ya que:

Los radionucleidos que pueden intervenir en la RUTA: aire ---> pasto ---> vaca ---> carne, deben de ser de vida media larga y presentar una alta movilidad en la cadena, el Cs-137 y el Sr-90 como posibles contribuyentes. El Sr-90 no es de importancia, ya que su acumulación se presenta en los huesos de los animales, que no son comestibles.

El pollo y el huevo son de autoconsumo. Las aves se crían en forma doméstica, en base a una alimentación heterogénea que varía considerablemente con la época del año, lo que obliga a verificar los factores de transferencia obtenidos con una alimentación a base de granos y alimentos preparados con fines de comercialización.

Solo algunos radionucleidos presentes en el aire, agua o suelo aparecen en animales de consumo humano ya que solo pueden pasar a la cadena, radioisótopos como el Cs-137 que posee propiedades químicas muy similares a las del potasio, Sr-90 o Ra-226 que se metabolizan en forma similar al calcio y los radioisótopos de elementos esenciales para la vida como el H-3 y el C-14.

3.1.2 ECOSISTEMAS ACUATICO, MARINO Y ESTUARIO

El comportamiento de los materiales radiactivos en los diversos tipos de aguas no es necesariamente el mismo. Las propiedades físicas y químicas de un radionucleido son mucho más importantes en los ecosistemas acuáticos que en los terrestres.

Una ruta de exposición terrestre por lo general solo involucra 2 o 3 niveles tróficos (etapas en la cadena alimentaria). Muchos de los alimentos de origen terrestre crecen y son producidos en situaciones donde muchos de los factores que afectan la transferencia de radionucleidos se modifican o pueden ser controlados. Más aun, la producción tiene lugar en regiones o sitios geográficamente bien determinados. En los ecosistemas de aguas continentales y oceánicas las cadenas alimentarias tienen un número mayor de niveles tróficos, una cadena simple como: agua-algas-zooplacton-crustáceos-peces-hombre implica 5 niveles tróficos. El tipo de cadena alimenticia es más compleja por el hecho de que los predadores pueden consumir varios tipos de especies de diferentes niveles tróficos. La naturaleza de cada tipo de cadena puede cambiar considerablemente la localización aún dentro del mismo cuerpo de agua ya que diferentes nichos en la cadena pueden llenarse con organismos diferentes. Otro factor que complica el modelado de un ecosistema acuático es que existen numerosas especies en la cadena alimenticia acuática que son móviles y aun más, migratorios y pueden recorrer distancias muy grandes. En algunos casos se requiere de concentraciones promedio de grandes distancias y en diferentes tipos de medio ambiente (ej. el salmón, camarón etc.) para poder predecir los factores de incorporación de un radionucleido dado.

Las propiedades físicas y químicas de un radionucleido son más importantes y variables en un ecosistema acuático que en el terrestre y pueden tener un efecto mayor sobre la transferencia de radionucleidos. Existen tres mecanismos importantes que afectan la concentración de un radionucleido en un cuerpo de agua que son: 1) formación de coloides, 2) co-precipitación y 3) absorción-desorción

en sedimentos y sólidos suspendidos. Estos mecanismos proporcionan un medio para la reconcentración de la radiactividad disuelta.

Los coloides son suspensiones de partículas muy finas generalmente de compuestos insolubles. Su pequeño tamaño (generalmente de 0.005 a 0.2 μm) actúa como disparador de la precipitación y tiene cargas eléctricas presentes. La formación de coloides es típica de elementos pesados incluyendo tierras raras (La, Ce, etc.) o algunos elementos de transición (tales como Co y Fe), Torio y Uranio. La formación de coloides es una fuente importante de reconcentración a partir de la fase disuelta de aquellos radionucleidos que forman coloides. Las partículas formadas tienen el tamaño de las partículas consumidas por muchos organismos acuáticos como entrada importante a la cadena alimenticia. De acuerdo a algunos estudios realizados, la ingestión de partículas de Zn-65, Fe-59 y Co-60 es el principal mecanismo de concentración de estos radionucleidos en ostiones.

La concentración de un radionucleido en agua es baja (trazas) pero puede precipitarse junto con otros elementos que se encuentran en concentraciones mayores por el proceso llamado co-precipitación. Este proceso se ve favorecido si el radionucleido reacciona con el precipitante formando una red cristalina similar a la del elemento mayor o si el radionucleido forma un precipitado insoluble con el precipitante. La co-precipitación de radio en sulfato de bario es un ejemplo en que se cumplen las dos condiciones. El hidróxido de hierro III se precipita bajo una gran variedad de condiciones ambientales y es un importante "acarreador" de radionucleidos co-precipitados con él.

En las aguas de los ríos, la concentración de los elementos de tierras alcalinas, como el Ca, Sr y Mg, disminuye debido a los procesos mencionados en comparación con el agua de mar. Cuando el agua dulce y salada se mezclan en un estuario, las concentraciones de estos elementos disminuyen en virtud de la dilución proporcionada por el agua dulce. En contraste, los elementos de transición, Fe, Mn, Cu, Co, Zn y Ni, disminuyen en agua de mar. En la

zona de mezclado de agua dulce-agua de mar (estuarios) se presentan cambios químicos que afectan la concentración de un determinado radionucleido. Los dos cambios principales son en cuanto a la concentración de electrolitos y el pH. En estas condiciones también las partículas coloidales colocan y precipitan el Fe, Mg, Al y Si coloidal en hidróxidos gelatinosos. La precipitación de hidróxido de hierro III puede producir la co-precipitación de Zr-95, Nb-95, Ru-106, Rh-106, Ce-144, Pr-144 y los elementos de transición. Esta precipitación explica las bajas concentraciones de los elementos de transición en agua de mar y las altas concentraciones de estos elementos que se presentan en los organismos bentónicos.

El los océanos, el Sr, Cs, Zn y Cu se encuentran fundamentalmente en forma iónica, el Cs por ejemplo siempre se encuentra en solución, otros elementos se encuentran perfectamente en forma de partículas, como el Fe, Mn, Co, las tierras raras, Ru, Zr, Nb, Y y Th.

Para evaluar la concentración en una determinada especie con fines de determinar rutas de exposición críticas, se usan los llamados factores de bioacumulación o factores de concentración. Este factor se define para una especie y un radionucleido determinado, como la concentración en equilibrio del isótopo en el organismo sobre la concentración (actividad específica) en agua o tierra ,esos factores son experimentales y se encuentran reportados en la literatura para una gran variedad de especies de agua dulce y agua de mar, así como para legumbres, cereales, (ecosistema terrestre).

La bioacumulación de radionucleidos en organismos no es un fenómeno que sea peculiar de los radioisótopos, ya que el fenómeno se presenta asociado con el metabolismo de los elementos estables, podemos afirmar que los radioisótopos en este caso actúan como trazadores. Cuando la relación de concentración es mayor que 1, se dice que existe bioacumulación y esta varía de una especie a otra y de un radionucleido a otro, dependiendo de la abundancia del isótopo estable en el medio y de la afinidad que presente la

especie al elemento estable. Por regla general, en el ecosistema acuático los organismos que presentarán mayores factores de bioacumulación son los filtradores y los que presentan mayores concentraciones de elementos estables a los cuales es afin el isótopo radiactivo. Por ejemplo, si un organismo acumula calcio, es de esperarse que tenga factores de bioacumulación altos para los radioisótopos del calcio y de la familia del calcio, como estroncio, magnesio, bario, berilio y radio. Si un organismo presenta altas concentraciones de sodio y potasio es de esperarse que bioacumule cesio-137 y cesio-134.

Por otra parte, como el principal interés desde el punto de vista dosimétrico es la ingestión por el hombre de peces y mariscos, es importante conocer los factores de bioacumulación en las partes comestibles de estos organismos.

En peces de agua dulce los radionucleidos que tienen mayores factores de bioacumulación son los isótopos del cesio (cesio-137, cesio-134), zinc (zinc-65), circonio/niobio-95, cromo (cromo-51) y rutenio (rutenio-106) cuyos factores de bioacumulación oscilan entre 100 y 1 000. En invertebrados son importantes el zinc-65 ($Fb - 1.0 \times 10^4$), el cesio-137, cesio-134, bario/lantano-140, cerio-144, hierro-59 y cromo-51 entre otros.

En base a su rendimiento en la fisión del uranio, vida media larga e importancia biológica, los productos de fisión y activación que pudieran encontrarse en la biota marina, en cantidades significativas, en orden creciente de factores de bioalimentación son: zinc-65, hierro-59, circonio/niobio-95, cromo-51, rutenio-103, cobalto-60 y cerio-144.

4. RADIONUCLEIDOS MAS FRECUENTES Y CAUSAS POR LAS QUE SE PRESENTAN EN ALGUNOS ALIMENTOS

Cuando se va a realizar una investigación de contaminación radiactiva de alimentos, debe analizarse primeramente el tipo de emisión de contaminantes que se presentó.

Pueden considerarse 3 tipos de emisiones:

- Gases nobles
- Radioyodos
- Partículas

Los gases nobles no se consideran contaminantes de los alimentos, por lo que se le da más importancia a los radioyodos y a las partículas.

La forma práctica de conocer el tipo de radionucleido, así como la cantidad de éste que se encuentre en el ambiente y pueda llegar a contaminar al alimento, es realizando un análisis por espectrometría gamma en una muestra de aire.

Con esta medición se conocen los radionucleidos emisores gamma presentes en el ambiente. Si se sospecha también la presencia de contaminantes beta, tales como el Estroncio-90, se requiere de la toma de muestras donde puede encontrarse el radionucleido y realizar un análisis radioquímico y su detección en un equipo proporcional de flujo.

Una vez que se conocen los radionucleidos presentes en el medio, se prosigue con un muestreo de los materiales que puedan estar contaminados. En general, los de mayor importancia en la contaminación de muestras ambientales y alimentos son:

- Aire: I-131, Cs-134, Cs-137
- Agua: H-3, Sr-89, Sr-90, I-131, Cs-134, Cs-137
- Suelo: Sr-90, Cs-134, Cs-137, Pu-238, Am-241, Cm-242
- Leche: Sr-89, Sr-90, I-131, Cs-134, Cs-137
- Carne: Cs-134, Cs-137

- Vegetales: I-131, Cs-134, Cs-137, Sr-89, Sr-90, Zr-95,
Nb-95, Ru-103, Ce-141, Ce-144

La importancia de considerar muestras ambientales radica en que el aire, agua y suelo son elementos fundamentales en los procesos de transporte y son los primeros indicadores de la contaminación radiactiva.

Otro aspecto que debe tomarse en cuenta al planear el muestreo de alimentos es el tiempo que ha transcurrido desde el momento de la liberación hasta el momento de la toma de muestras, ya que por ejemplo, si en el agua se encuentra Sr-90, que es uno de los contaminantes esperados en leche, si se analiza una muestra de leche dentro de las primeras horas, no se encontrará Sr-90 en la misma, ya que aún no ha sido asimilado por el ganado y por lo tanto no existe su depósito en la leche.

En muchos países la LECHE y sus derivados constituyen un elemento básico en la dieta de la población, principalmente de la población infantil.

Dentro de los primeros días posteriores a una liberación de radionucleidos, la leche comúnmente es contaminada por yodo, cesio y estroncio radioactivos. La contaminación de la leche será mayor si el ganado se encuentra pastando en exteriores, esto no quiere decir que si el ganado se mantiene en interiores no habrá contaminación de la leche, pues ésta puede ocurrir por inhalación de aire contaminado, principalmente en el caso de radioyodos, o bien por ingestión de agua o alimentos que contengan radionucleidos.

En cuanto a las causas por las que se pueden encontrar estos radionucleidos en los alimentos son como mencionamos anteriormente, accidentes de plantas nucleares, centros de investigación y hospitales que usan materiales radiactivos y fundamentalmente detonaciones de armamentos nucleares en la atmósfera.

Durante un accidente los materiales radiactivos de fuentes tales como plantas nucleares, hospitales y centros de investigación, son liberados a la atmósfera a una altura entre el nivel del suelo y unos 100 metros de altura, esta region se encuentra dentro de la región conocida como "capa de mezcla", la cual tiene un grosor que varia desde unos cuantos metros sobre el nivel del piso a unos 2000 metros de altura.

La principal fuente de emisiones de radiactividad al ambiente por la generación de energía, es la que se conoce como ciclo del combustible nuclear, que es el conjunto de actividades relacionadas con la producción de electricidad con reactores nucleares de potencia. La otra fuente importante la constituye el quemado de combustibles fósiles, ya que contienen elementos radiactivos de origen natural.

Otra de las fuentes de contaminación al ambiente es la minería. Los residuos de uranio contienen los descendientes radiactivos de las cadenas del U-238 y del U-235. De estos, el Ra-226 (vida media 1600 años) y el Rn-222 (vida media 3.82 días) son de particular interés ya que el radio puede ser lixiviado de las presas de residuos y contaminar corrientes de agua para consumo humano o para riego, y de esta forma entra a la cadena alimenticia humana. El radón puede difundirse de las capas superiores de los residuos y si existieran edificios o casas sobre ellos, se puede llegar a concentraciones inaceptables de radón o de sus descendientes dentro de estos. El potencial de estos residuos se conserva durante cientos de miles de años, ya que el precursor del Ra-226 y del Rn-222 es el Th-230, el cual tiene una vida media de 7 700 años.

El control de los residuos se efectúa poniendolos en presas para reducir el riesgo de entrada de corrientes superficiales que arrastren o lixivien el Ra-226. Estos residuos se recubren con tierra para reducir la difusión del radón hacia la atmósfera y para proteger el arrastre de los residuos por vientos o por el agua.

Es importante tomar en cuenta que al utilizar minerales en los procesos industriales hay algunos casos de contaminación radiactiva, por ejemplo, la producción de fertilizantes fosfatados, produce una cantidad significativa de fosfoyeso, un desecho que puede ser utilizado como material de construcción y que contiene cantidades importantes de uranio, radio-226 y otros miembros de la cadena del uranio. La utilización de estos fertilizantes contribuye a la diseminación de estos radionucleidos naturales al medio ambiente.

La contaminación del medio ambiente por accidentes de plantas nucleares es muy importante ya que en el pasado han ocurrido accidentes en centrales nucleares, que han ocasionado la liberación de productos de fisión al ambiente. El accidente más importante ocurrió el 26 de abril de 1986 en el reactor Chernobyl-4 en la Unión Soviética. Este accidente destruyó el núcleo del reactor, y ocasionó que se liberaran al ambiente alrededor de 50 MCi de productos de fisión, que causaron una contaminación en extensas zonas de Europa central y oriental y una dosis colectiva de 1 200 000 persona-Gy en el hemisferio norte (informe USDOE/ER-0332, Agosto de 1987). Otros reactores han sufrido accidentes serios, como el reactor Three Mile Island II en 1979 en Estados Unidos, donde se destruyó el núcleo, pero con liberación pequeña de material radiactivo. El reactor Windscale en 1957 en Inglaterra, sufrió un accidente que ocasionó una importante contaminación del ambiente.

5. EFECTOS BIOLÓGICOS EN EL HOMBRE

5.1 EFECTOS BIOLÓGICOS DE LA RADIACIÓN

EFECTOS BIOLÓGICOS A NIVEL CELULAR Y ORGANICO

Las células son las unidades fundamentales de la estructura de los organismos vivos, tal como lo es el átomo en la estructura de los compuestos químicos.

La célula está compuesta de agua, sales inorgánicas y un número de macromoléculas (proteínas, ácidos nucleicos, lípidos y carbohidratos). El hombre adulto tiene alrededor de 5×10^{10} células. La mitosis o división celular es un proceso reproductivo especialmente rápido en los primeros años de vida, hasta antes de llegar a la madurez, sin embargo, este proceso nunca cesa.

La radiación afecta a los organismos vivos, principalmente por alteraciones en la habilidad de las células para reproducirse normalmente, es decir, las células dañadas por efecto de la radiación no se reproducen de la misma manera que las células sanas. Esta alteración es ocasionada por el proceso de ionización directo o indirecto.

El proceso de ionización puede describirse de la manera siguiente:

Las células vivas están formadas en su mayor parte por agua, la radiación que pasa a través de una célula, lo hace como si chocara con moléculas de agua. Cuando la radiación ionizante es absorbida en el tejido en la primera etapa física, la energía es cedida al medio y en consecuencia principalmente a las moléculas del agua. Esta energía provoca perturbaciones fundamentalmente en el medio absorbente quedando la molécula de agua ionizada, si es arrancado un electrón periférico formándose un par iónico ó solamente excitada, si permanece ligado a la molécula. Este proceso transformará a las moléculas de agua en entidades inestables sumamente reactivas, capaces de en una segunda etapa fisicoquímica

llevar a cabo una compleja cadena de reacciones creando nuevas moléculas, incluyendo los "radicales libres" caracterizados por tener un electrón no apareado y por lo tanto con una vida media muy corta y que en la siguiente etapa química interaccionen entre sí o con otras moléculas como el oxígeno y producen "blanqueadores", los cuales son suficientemente capaces de romper las moléculas como las proteínas provocando modificaciones químicas y bioquímicas irreversibles resultando un efecto biológico. Como ejemplo de estos blanqueadores tenemos el radical hidroxiperoxi y el peróxido de hidrógeno. Esta etapa química está marcada por fenómenos de óxido-reducción en los cuales la presencia de aire tiene una influencia no despreciable.

A esta acción de la radiación sobre las sustancias disueltas por intermedio de un solvente, se le conoce como "efecto indirecto".

En el caso de las importantes enzimas, que están hechas de moléculas de proteína y el blanqueo producido por la radiación, eliminan el átomo de hidrógeno de las uniones HSH de la enzima, dando como resultado una destrucción del control de sus funciones en la división celular.

El efecto de la radiación sobre un organismo vivo, se produce a nivel celular y es de naturaleza fisiológica y morfológica. El grado de daño depende de muchas condiciones y factores.

Los efectos sobre células individuales son complicados por la interacción entre células dañadas y no dañadas. Los cambios secundarios resultantes son principalmente procesos de adaptación o reparación, tal como ocurre con la respuesta a agentes dañinos diferentes a la radiación. Aún cuando tales cambios enmascaran efectos de la radiación sobre células simples, no existe evidencia de que las células individuales en los animales difieran cualitativamente de los microbios o de las plantas en su respuesta a la radiación.

Los tejidos y órganos del cuerpo están formados por células, que difieren en su naturaleza, función, apariencia y también en su respuesta a la radiación. Esta diferencia se define como "radiosensibilidad". De esto resulta que ciertos órganos y tejidos serán los que reciban mayor daño después de una exposición a la radiación. De este conocimiento se ha concluido que los niños se afectan más que los adultos.

Además de la capacidad reproductiva, existen otros factores significativos en la radiosensibilidad. Entre los más importantes están: a) la etapa de la división celular, b) la actividad celular y c) la contribución de la célula al sostenimiento del tejido.

ORDEN DECRECIENTE DE RADIOSENSIBILIDAD CELULAR

- 1.- Linfocitos, células blancas de la sangre, formadas en tejidos del bazo y ganglios linfáticos.
- 2a.- Granulocitos, células blancas de la sangre formadas en la médula ósea. Estas células se utilizan para combatir las infecciones bacterianas.
- 2b.- Cristalino de los ojos. Especialmente sensibles a los neutrónes rápidos.
- 3.- Células basales, llamadas así, porque son productoras de las células más complejas y especializadas de las gónadas, la médula ósea, la piel y el tracto digestivo.
- 4.- Células en los pulmones, células alveolares.
- 5.- Células del ducto biliar. Desarrollan un papel muy importante en la digestión.
- 6.- Células tubulares de los riñones.
- 7.- Células que cubren las cavidades cerradas del cuerpo, tales como el corazón y los vasos sanguíneos. Se les conoce como células endoteliales.
- 8.- Células estructurales de los tejidos, conocidas como células conectoras de tejidos.

9.- Células de los músculos.

10- Células óseas y células nerviosas.

PROTECCION Y RECUPERACION DE CELULAS DAÑADAS

Las células pueden ser protegidas contra los daños por radiación antes, durante y después de ésta.

Muchas clases de células pueden protegerse de ser inactivadas por anoxia (falta de oxígeno) durante la irradiación. Generalmente la efectividad de la radiación puede ser reducida a 1/3 por tal tratamiento. Un cierto número de sustancias que protegen contra la radiación probablemente actúan eliminando oxígeno. Sin embargo, otras sustancias, especialmente ciertos compuestos de sulfuros orgánicos, actúan en forma diferente. Disminuyendo la temperatura de irradiación y eliminando agua también se ofrece cierta protección.

La recuperación se efectúa también por la participación activa del metabolismo celular. En algunos casos, la inhibición de una o más fases del metabolismo celular después de la irradiación, ha ayudado a la recuperación. Tal vez, la célula toma más tiempo en su recuperación si procesos como la duplicación cromosómica o división celular son inhibidos por algún tiempo. Aunque está claramente establecido que los daños a las células son potencialmente letales o hereditarios, pueden ser reparados después de la irradiación y el tiempo para hacerlo varía grandemente, muchas evidencias sugieren que el intervalo raramente es, si acaso, mayor que el de una generación celular. Cuando una célula dañada muere, no es reemplazada, ni se llena el espacio que deja en el tejido.

Otro efecto es que la célula esté tan alterada, que sus células hijas sean genéticamente diferentes a ella. Estas células hijas pueden morir antes de reproducirse, o su velocidad de división puede ser mayor o menor que la de sus células madres, en ambos casos resultan anomalías.

EFFECTOS GENETICOS Y EFFECTOS SOMATICOS

Los efectos biológicos de la radiación pueden ser clasificados en dos categorías: efectos genéticos y efectos somáticos.

Efectos genéticos: son efectos biológicos de la radiación que resultan en cambios en los genes de las células reproductivas y se expresan en el descendiente del individuo irradiado en la forma de mutaciones. Las mutaciones ocurren en todos los organismos vivos. Pueden ser inducidas por agentes tales como la radiación, productos químicos o bien ocurrir espontáneamente.

Debe hacerse una distinción entre mutaciones y defectos de nacimiento. Una mutación será transferida de generación en generación. Muchas mutaciones son tan inconsecuentes que pueden no ser notadas nunca. Los defectos de nacimiento son debidos a cambios en el tronco celular de los fetos y generalmente no son transferidos de generación en generación, pueden variar desde grandes anormalidades físicas hasta alteraciones en el metabolismo de los alimentos.

Los efectos genéticos de la radiación pueden ser demostrados en plantas y animales pero no se han observado en poblaciones humanas, quizá porque pocas personas han recibido las altas dosis de radiación intensionalmente necesarias para producir efectos genéticos.

Efectos somáticos: Son efectos biológicos de la radiación que se manifiestan en el individuo expuesto. Los efectos somáticos pueden ser divididos en dos grupos : efectos pronto y efectos retardados.

* Los efectos pronto (llamados también efectos agudos o tempranos) son observados poco tiempo después que el individuo recibe una dosis alta de radiación en un período corto de tiempo. Están comunmente asociados a un umbral. Se han observado en individuos que estuvieron expuestos a la radiación en accidentes industriales, tratamientos médicos, guerra atómica y pruebas de

armas atómicas. Los efectos agudos de la radiación incluyen náuseas, fatiga, desórdenes sanguíneos, pérdida de pelo temporal o permanente, quemaduras en la piel, y en casos extremos, la muerte.

Los efectos agudos observados dependerán de si todo el cuerpo estuvo expuesto a la radiación o si solamente una parte de él fue irradiado.

Si se siguen prácticas de protección adecuadas, los efectos pronto nunca deberán ser observados en personas ocupacionalmente expuestas.

* Los efectos retardados pueden resultar de dosis agudas de radiación y son la principal consecuencia de dosis de radiación crónica. Una dosis de radiación crónica es cuando se está sujeto a continuas o repetidas dosis de radiación bajas por largos períodos de tiempo. Los efectos retardados son primero la inducción de cáncer y formación de cataratas. Estos efectos retardados no están asociados con umbrales pero si con probabilidades de ocurrencia. La probabilidad de formación de cáncer está relacionada con la dosis de radiación; cuando la dosis de radiación aumenta, la probabilidad de cáncer aumenta. Sin embargo, si el cáncer es inducido, la severidad y la consecuencia final no están relacionadas a la dosis de radiación causante. Una relación entre dosis de radiación e inducción de cancer se ha mostrado en individuos que han estado expuestos a altas dosis de radiación; por ejemplo, los sobrevivientes japoneses de la bomba atómica y de la Isla Marshall que estuvieron expuestos a lluvia radiactiva de pruebas de armas atómicas.

La relación exacta entre dosis crónica de bajo nivel, tal como la recibida por trabajadores con radiación, y la inducción de cáncer es difícil de establecer por varias razones:

a) El cáncer producido por radiación es indistinguible del cáncer que ocurre espontáneamente.

- b) La existencia de inducción de cáncer puede ser inferida solamente en términos de exceso de cáncer sobre la incidencia natural.
- c) La incidencia natural de cáncer varía sobre varios órdenes de magnitud dependiendo del tipo y sitio del neoplasma (tejido anormal).
- d) Edad, sexo y otros factores físicos.
- e) La longitud de tiempo transcurrido entre la irradiación y la aparición de cáncer (tiempo de latencia) clínicamente diagnosticable, complica el seguimiento y observación de una población.

La radiación puede producir cataratas. En contraste con el cancer inducido por radiación las cataratas inducidas por radiación pueden, en algunos casos ser distinguidas de las cataratas ocurrentes en forma natural, durante su estado formativo.

La catarata producida por radiación puede llegar a hacerse estacionaria a una magnitud que produce un pequeño o ningún deterioro de la visión; mientras a altas dosis de radiación la catarata puede progresar hasta producir una pérdida significativa de la visión.

Se ha reportado un tiempo de latencia entre la irradiación y la aparición de opacidad del cristalino del ojo de 6 meses a 35 años y una dosis umbral de 2 Sv (200 rem)

EFFECTOS DE EXPOSICION AGUDA EN RELACION CON LA DOSIS A CUERPO ENTERO

Dosis aguda Sv (rem)	Naturaleza de los efectos
0.05-0.23 (5-23)	Dosis mínima detectable por análisis cromosómico u otro análisis especializado.
0.25-1.25 (25-125)	Cambios ligeros en la sangre.

Dosis aguda Sv (rem)	Naturaleza de los efectos
0.75-1.25 (75-125)	Dosis aguda mínima necesaria para producir vómito en aproximadamente 90% de la gente expuesta.
1.5-2.0 (150-200)	Cambios sanguíneos. Incapacidad temporal.
3.0-5.0 (300-500)	Dosis letal media.

RELACION DOSIS-EFECTO PARA IRRADIACION AGUDA A PARTE DEL CUERPO

Dosis aguda Sv (rem)	Organo	Efecto en el órgano relevante
0.5 (50)	testículos	Esterilidad temporal
8.0 (800)	testículos	Esterilidad permanente
2.0 (200)	ovarios	Amenorrea temporal, esterilidad
8.0 (800)	ovarios	Menopausia permanente, esterilidad
5.0 (500)	piel	Enrojecimiento temporal y pérdida de pelo.
20.0 (2000)	hígado	Hepatitis
25.0 (2500)	piel	Ulceración temporal. pérdida permanente del pelo.

EFFECTOS ESTOCASTICOS Y NO ESTOCASTICOS

Efectos no estocásticos:

Cuando la gravedad de los efectos depende de la magnitud de la dosis. Existe una llamada "dosis umbral", debajo de la cual los efectos no se manifiestan. Generalmente son los efectos agudos y a niveles de dosis altas.

Efectos estocásticos:

Cuando la probabilidad de ocurrencia y no la gravedad del efecto está en función de la dosis. No tiene "dosis umbral". Son estocásticos todos los efectos genéticos o hereditarios y algunos efectos somáticos como la carcinogénesis.

Las reglas de protección contra la radiación para trabajadores ocupacionalmente expuestos y la población como un todo deben ser tales, que el riesgo a la radiación-inductora de cáncer durante la vida de un individuo y de los efectos genéticos sean extremadamente pequeños.

EFFECTOS SOBRE LA EMBRIOGENESIS

Los riesgos dependerán del estado de desarrollo del producto y de la magnitud de la dosis recibida.

En la etapa de preimplantación, que es durante los primeros 6 días de vida, el riesgo de exposición es la muerte intrauterina. DLo se ha estimado en un rango de 0.1-1.4 Gy (10-140 rad).

En la etapa embriogénica, durante la cual se empiezan a formar los órganos (organogénesis), los riesgos incluyen muerte y malformaciones.

En el estado fetal, durante el cual se efectúa un desarrollo y maduración de órganos, el principal riesgo es el de un desenlace fatal o malformación.

5.2 METABOLISMO DE LOS RADIONUCLEIDOS EN EL HOMBRE

Cuando se introduce un radionucleido al organismo, sea en forma accidental o como un procedimiento de estudio o tratamiento, resulta interesante conocer el camino de ese radionucleido dentro del organismo y su tiempo de permanencia, determinando si existe algun organo blanco.

La gravedad de una exposición esta en función de:

- 1.- La acción biológica sobre los órganos en donde se concentra y la forma como el elemento es retenido.
- 2.- La forma física tal como la naturaleza y energía de los rayos, la vida media del elemento.
- 3.- La cantidad depositada inicialmente.

La combinación de las dos primeras acciones permiten determinar el "PERIODO EFECTIVO" resultante de los periodos de radiactividad física y biológica del radionúclido.

Toda exposición interna se desarrolla en etapas sucesivas:

- 1.- Depósito, al nivel de una puerta de entrada: piel, mucosas, aparato digestivo, aparato respiratorio, herida.
- 2.- Absorción, es decir, transferencia hacia la sangre y de ahí a los líquidos extracelulares y órganos (coeficientes de transferencia).
- 3.- Repartición de la cantidad absorbida en el organismo de manera difusa o localizada en ciertos organos o tejidos (órgano blanco).
- 4.- Retención sistémica. La suma de esta retención y la alcanzada en las puertas de entrada, proporcionan la retención total.
- 5.- Excreción, esencialmente urinaria o fecal.

La conducta a seguir en el caso de una incorporación al organismo de una substancia radiactiva queda estrechamente ligada a las acciones metabólicas y éstas dependen de las condiciones biológicas del medio y las condiciones fisicoquímicas del contaminante.

La urgencia e importancia del método terapéutico está en función de la gravedad de la contaminación, la cual depende entre otros factores de:

- 1.- Cuáles son los órganos de depósito.
- 2.- La naturaleza de la emisión radiactiva del isótopo contaminante.
- 3.- Su periodo efectivo (vida media efectiva).

Los radionucleidos se pueden clasificar en transferibles o solubles y poco transferibles o insolubles.

Elementos transferibles o solubles

Cuando son fácilmente solubles en el medio biológico y pueden migrar de un órgano a otro o bien ser eliminados por las vías naturales de excreción, orina o heces.

Elementos poco transferibles o insolubles

Estos resultan completamente opuestos a los anteriores, ya que el radionucleido permanece en el sitio de depósito.

La CIPR clasifica a los radionucleidos según su solubilidad en 3 categorías:

La clase D: que dejan su sitio de depósito o son eliminados con una vida media biológica de días ($t_{1/2}$ inferior a 10 días).

La clase W: Donde la unidad para la vida media biológica es de semanas ($t_{1/2}$ 10-100 días).

La clase Y: Donde la unidad apropiada es el año ($t_{1/2}$ superior a 100 días).

MODELOS METABOLICOS Y DOSIMETRICOS

Los modelos metabólicos integran los coeficientes de transferencia (fracción incorporada que pasa a la sangre y fracción que pasa de la sangre al órgano de referencia) y la cinética.

Los modelos dosimétricos que agregan a los anteriores la noción de masa irradiada y de dosis de irradiación. Los modelos que han sido propuestos y estudiados son el "modelo pulmonar" y el "modelo digestivo".

Describiremos a continuación el metabolismo de los principales productos de fisión del uranio cuya determinación se presenta en este trabajo.

Yodo radiactivo.

De todos los isótopos radiactivos, los del yodo radiactivo son de los mas estudiados, tanto su metabolismo como su radiotoxicidad.

Son una herramienta muy útil para el estudio del funcionamiento de la glándula tiroides y para el tratamiento de ciertas patologías.

Los radionucleidos del yodo particularmente el yodo-131, estan presentes en abundancias dentro de los productos de fisión del uranio.

Por lo que respecta a su metabolismos alrededor de 9/10 del yodo presente en el organismo se encuentra en el interior de la glándula tiroides (0.5 a 1 mg/g, o sea 10 000 veces mas que en la sangre).

La fuente son los alimentos y las bebidas. En Francia por ejemplo la cantidad ingerida es de alrededor de 100 μg , hasta 200 μg en USA, pero no sobrepasa 30 a 50 μg en los países con carencia.

En Francia el 50% del yodo proporcionado por la alimentación se fija en la tiroides. Si la alimentación es mas rica en yodo, la tasa de fijación será menor (25%), pero puede llegar hasta el 75% en los países con carencia.

La absorción digestiva de los yoduros es rápida (menos de 3 horas) y son distribuidos en todos los espacios extra-celulares, "el espacio yoduro" representa alrededor de 35% del peso de una persona (18 a 25 litros). Dos órganos son principalmente capaces de extraer el yoduro del suero, el riñón y la glándula tiroides.

En la tiroides el yodo es fijado bajo la forma de yoduro que en seguida es oxidado y fijado sobre una molécula de tiroglobulina para formar después la hormona tiroidea. El 50% del yodo fijado en la tiroides está bajo la forma de hormona tiroxina y triyodotironina, y por tanto es secretable, es la forma de salida. La duración promedio de estancia del yodo en la tiroides es en un sujeto normal de alrededor de 60 días, disminuido en ciertas afecciones y prolongado en el bocio.

La tiroides pesa al nacer 1 g, 2 g a los 6 meses, 14 g a los 14 años, 20 g a la edad adulta y disminuye después de los 50 años.

El embarazo no modifica la actividad tiroidea.

Para los isótopos del yodo, su vida media efectiva, la facilidad de detección y su preponderante concentración en un órgano, hacen fácil el cálculo de la dosis equivalente comprometida. Las dosis absorbidas, por ingestión de 1 mCi de los diferentes isótopos son, por ejemplo a la tiroides: por I-131, 1300 rads/mCi,

y para el organismo entero de 0.71 rads/mCi; por I-123 y I-132,

13 rads/mCi a la tiroides y al organismo entero 0.029 rads/mCi y 0.11 rads/mCi respectivamente.

Por lo que respecta a la radiopatología la administración de yodo-131 provoca un hipotiroidismo, en función de la dosis, por ejemplo 30 $\mu\text{g/g}$ provoca hipotiroidismo en 2 años en el 10% de los sujetos, y en alrededor del 40% para una concentración de 150 $\mu\text{g/g}$.

Los cánceres radioinducidos son de aparición tardía.

En el hombre, la frecuencia de nódulos tiroideos benignos y de cáncer de la tiroides están lejos de ser despreciables. El análisis de los efectos de una irradiación es delicado. Se nota sin embargo un aumento de cancer, donde la mortalidad es baja (alrededor del 5%) si es bien pronosticado. Parece que la gente joven es la más sensible.

Las fuentes son los efluentes gaseosos, por ejemplo los de un reactor PWR contienen $5 \times 10^{-5} \text{Ci/MWe}$ por año y los efluentes líquidos 1 mCi.

En la vecindad de la fábricas de retratamiento, son liberados 73 mCi por MWe.

Es necesario comparar estas cifras con el consumo de 10Ci/año de I-131, en un servicio de medicina nuclear.

En cuanto a los desechos el sólo isótopo a considerar es el I-129, pero su baja actividad específica y proporción, no pueden provocar una irradiación grande de la tiroides.

En los accidentes de Windscale (1957) y Three Mile Island (1959) 20.000 y 12 Ci de I-131 respectivamente, fueron liberados a la atmósfera. En Inglaterra se prohibió el consumo de leche de los alrededores durante 6 semanas, y en los Estados Unidos la dosis máxima a la tiroides fué de 2 mrad, o sea el equivalente a una semana de irradiación natural.

El LAI para el I-131 es de 5.4 μCi para inhalación y de 2.7 μCi para la ingestión. Para el I-129, estas actividades máximas son respectivamente de 0.8 y 0.5 μCi .

En caso de accidente el tratamiento se hace por ingestión de yoduro de potasio para bloquear la absorción por la tiroides. Para los trabajadores, puede ser preventivo si se sabe que va a correr algún riesgo.

Estroncio.

Su metabolismo cercano al del calcio justifica el interés por él. Los isótopos 89 y 90 son productos de fisión del uranio, y constituyen una de las principales fuentes de radiactividad de los ensayos nucleares.

En relación a su absorción, es la cadena alimenticia la que constituye, en el hombre, la principal vía de penetración del estroncio liberado en el ambiente.

La absorción del estroncio a nivel intestinal es de alrededor del 30% ya sea que el isótopo esté en solución acuosa o incorporado a los alimentos. En el joven esta absorción está aumentada por lo menos por un factor de 2 y en los recién nacidos el aumento es igualmente de al menos un factor de 2.

La inhalación conduce a una carga ósea.

El estroncio después de franquear la pared intestinal o pulmonar, penetra en la circulación sanguínea donde se asocia en parte a las proteínas. Su tiempo de vida media plasmática es del orden de algunas horas. El paso de la barrera placentaria es rápido (10 min). Los huesos fetales retienen el estroncio 4 veces más que los de la madre.

El período biológico del estroncio 90 se ha estimado en el hombre de 2500 días en una población de pintores de carátulas luminosas. No se sabe, si estos valores se aplican a los niños y adolescentes.

En el adulto cerca del 99% del estroncio es retenido en el esqueleto donde la repartición no es homogénea. Se fija como el calcio, en las zonas de crecimiento activo de los huesos. La excreción se hace por vía urinaria, y es máxima el primer día después de la absorción.

Por lo que respecta a su toxicidad mencionaremos que en la población de pintores de carátulas luminosas, felizmente recibieron una dosis baja y no permitió detectar ninguna patología en el hombre.

La inyección de una dosis fuerte de estroncio 90 puede provocar en la rata leucopenia precoz y estable.

En los animales, una inyección constante de estroncio puede provocar problemas en el crecimiento. También en los animales el estroncio provoca cáncer óseo donde la relación apropiada entre la dosis-respuesta no es lineal.

La CIPR propone los LAI* siguientes (expresados en μCi):

		Ingestión	Inhalación
Sr-89	soluble	540	810
	insoluble	540	135
Sr-90	soluble	27	18.9
	insoluble	540	2.7

* Límite anual de incorporación

Cesio.

El cesio es un álcali y por lo tanto su metabolismo es cercano al del potasio y por lo mismo fácilmente incorporable y ubicado en el organismo. Constituye una de las principales fuentes de radiactividad después de un accidente de un reactor nuclear. El isótopo 137 con una vida media radiactiva de 30 años es el isótopo más importante.

Después de la absorción intestinal, el cesio es enteramente transferido hacia la sangre. Después de la inhalación la transferencia hacia otros órganos es igualmente rápida. Cualquiera que sea el modo de contaminación, la excreción urinaria es siempre más importante que la excreción fecal. La vida media biológica se estima en alrededor de 100 días (68-165). La vida media biológica es más corta en los niños donde puede variar de 12 en los muy jóvenes a 57 en los adolescentes. También es más corta en la mujeres (84-127) que en el hombre.

El cesio, después de ser absorbido se reparte en los espacios extracelulares antes de entrar en equilibrio con el compartimento celular.

La terapia consiste en atraparlo a nivel intestinal antes de su absorción y durante los mecanismos de secreción reabsorción de los alcalinos que tiene lugar en el intestino. Es insolubilizado por la administración de azul de prusia (ferrocianuro férrico).

El LAI para el isótopo 137 es de 4×10^6 Bq para la ingestión y de 6×10^6 Bq por inhalación.

5.3 DOSIS INTERNA POR INGESTION DE ALIMENTOS CONTAMINADOS

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR) en su publicación 30 de 1980 "Limits for Intakes of radionuclides by

workers", ha recomendado el uso de modelos dosimétricos y datos metabólicos basados en un "individuo de referencia"(*) para calcular dosis de radiación interna por la ingestión de radionucleidos, tanto a tejidos individuales como al cuerpo entero (equivalente de dosis y equivalente de dosis efectivo, respectivamente). Estos modelos toman en cuenta la fracción depositada en cada órgano o tejido, la transferencia entre órganos del radionucleido, la energía depositada en el tejido, etc. Esta publicación solo tiene aplicación para adultos, sin embargo los modelos se pueden aplicar para grupos de edad.

Si la retención de un radioisótopo que emite radiación poco penetrante fuera la misma para un niño que para un adulto, la dosis por unidad de actividad sería mayor en el niño, porque sus órganos son más pequeños, además, para aquellos isótopos que tienen una vida media biológica larga, en los niños causarían una dosis mayor, porque su esperanza de vida al momento de la ingestión es mas larga que para un adulto.

Un aspecto importante es que la biocinética de los radionucleidos es para algunos de ellos, muy distinta entre los niños y los adultos. Puede ser que en los niños se deposite una fracción mayor de los radioisótopos, o bien los niños eliminan más rápidamente éstos. Por ejemplo, la vida media biológica del yodo aumenta con la edad, pero el depósito de yodo en la glándula tiroides es mayor en los primeros meses de vida.

El equivalente de dosis por unidad de actividad ingerida que causa el Sr-90 (vida media 28.5 años), es cinco veces mayor en un niño de 6 meses que en un adulto.

(*) El "hombre de referencia" usado para cálculo de dosis por el CIPR tiene entre 20 y 30 años de edad, pesa 70 kg y tiene una estatura de 1.7 m y vive en norteamérica o en europa occidental.

La absorción gastrointestinal de radionucleidos es mayor en el recién nacido, que en los adultos, hasta el destete. En un lactante de 6 meses el factor dosimétrico para Pu-239 ingerido en la dieta es unas 20 veces mayor que en el adulto.

La absorción en la biocinética de los radionucleidos en el cuerpo dependen de la forma química de éstos. Otros factores que pueden influir en esto son la condición nutricional del individuo y que otros componentes en los alimentos puedan competir con el radionucleido en cuestión.

Aunque esta descripción es aplicable a sólo una pequeña fracción de la población mundial, es de gran utilidad para el establecimiento de estándares de dosimetría y de protección. También se han publicado datos promedio de una mujer adulta y de niños de varias edades.

MASAS DE ALGUNOS ORGANOS DEL "HOMBRE DE REFERENCIA"
RECOMENDADOS POR LA CIPR

ORGANO	MASA (g)
Músculos	28,000
Tiroides	20
Riñones	310
Hígado	1,800
Médula ósea roja	1,500
Cuerpo entero	70,000

FACTORES DOSIMETRICOS

Para simplificar los cálculos de dosis por la incorporación de material radiactivo se utilizan factores dosimétricos que han sido calculados a partir de parámetros y modelos metabólicos.

Generalmente están divididos según el isótopo, el órgano o tejido y el grupo de edad. Estos factores dosimétricos por lo general se calculan para un tiempo de integración de 50 años, de esta forma los factores dosimétricos tienen unidades de equivalente de dosis comprometido efectivo por unidad de actividad (Sv/Bq)

Factores dosimétricos Fd (Sv/Bq)

Radionucleido	Niños de 1 año	Niños de 10 años	Adultos
Sr-90	1.1×10^{-7}	4.0×10^{-8}	3.6×10^{-8}
I-131 (*)	1.2×10^{-6}	1.2×10^{-6}	2.0×10^{-8}
Cs-137	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.3×10^{-8}
Pu-239	2.4×10^{-6}	1.4×10^{-6}	1.3×10^{-6}

(*) Equivalente de dosis a tiroides.

Para propósitos prácticos, la dosis anual recibida por la ingestión de un radioisótopo se calcula con la siguiente expresión

$$H_{ei} \text{ (Sv/año)} = m \text{ (kg/año)} \text{ Ci (Bq/kg)} \text{ Fdi (Sv/Bq)}$$

donde:

H_{ei} = equivalente de dosis comprometido efectivo integrado en cincuenta años, por la ingestión de un año (Sv/año)

m = consumo anual de alimentos (kg/año)

Ci = concentración en los alimentos del isótopo i (Bq/kg)

Los hábitos en el consumo de alimentos varían de una región a otra en el mundo, por lo que cuando se estiman dosis por ingestión se utilizan gastos regionales o globales dependiendo de la aplicación.

En la siguiente tabla se muestran algunos de los datos de consumo de alimentos por región:

Consumo Regional de alimentos (kg/persona año).							
DIETA	RAÍCES Y						
	CEREALES	TUBERCULOS	HORTALIZAS	FRUTA	CARNE	PESCADO	LECHE
Africana	127.4	134.8	26.9	46.2	18.8	15	28.9
CentroAmericana	110.2	46.9	38.8	9.6	42.3	18.7	8.2
China	171.7	86.8	86.2	5.8	16.0	8.9	1.9
Europa	121.1	72.7	86.7	81.4	75.3	20.2	54.9
Extrema Oriental	206.6	28.4	64.3	4.3	21.6	24.4	33.9
Mediterráneo Orien.	188.2	19.3	91.6	101.6	30.4	8.4	74.3
Norafricana	181.9	20.0	83.4	6.9	24.0	7.3	77.2
Sudamericana	129.5	67.6	34.2	83.2	46.4	14.4	70.7
Mexicana	173	14	32	62	25	11	100
Promedio	140	100	80	70	60	16	106

5.4 DERIVACION DE LOS VALORES DE ORIENTACION DEL CODEX APLICABLES A LOS ALIMENTOS TRAS UNA CONTAMINACION ACCIDENTAL

La organización mundial de la salud ha recomendado en su publicación "Niveles de Intervención derivados para Radionucleidos en alimentos" de 1989, valores de referencia para los niveles de intervención derivados en caso de una contaminación radiactiva generalizada como consecuencia de un accidente nuclear grave.

Estos valores están basados en una dosis anual de 5 mSv/año, es decir son la concentración en los alimentos de material radiactivo que ingiriéndose con una rapidez promedio causarían 5 mSv/año

En la siguiente tabla se muestran estas recomendaciones

VALORES DE REFERENCIA PARA LOS NIVELES DE INTERVENCIÓN DERIVADOS (NID) (Bq/kg)

TIPO DE RADIONUCLEIDO	CEREALES	RAICES Y TUBERCULOS	HORTALIZAS	FRUTAS
• Dosis alta por unidad ingerida (1×10^{-8} Sv/Bq)	35	50	80	70
•• Dosis baja por unidad ingerida (1×10^{-8} Sv/Bq)	3 500	5 000	7 000	10 000

TIPO DE RADIONUCLEIDO	CARNE	LECHE	PESCADO	AGUA POTABLE
• Dosis alta por unidad ingerida (1×10^{-8} Sv/Bq)	100	45	350	7
•• Dosis baja por unidad ingerida (1×10^{-8} Sv/Bq)	10 000	4 500	35 000	700

- Se aplica al Pu-239 y otros actínidos
- Se aplica a todos los demás radionucleidos de interés, incluidos el Cs-134, Cs-137, Sr-90 y el I-131

**VALORES DE REFERENCIA PARA LOS NIVELES DE INTERVENCION
DERIVADOS EN LA LECHE Y AGUA PARA BEBES* (Bq/l)**

Radionucleido	Valor Bq/l
Estroncio-90	160 (leche y agua)
Yodo-131**	1 600 (leche)
Cesio-137	1 800 (leche)
Plutonio-239	7 (leche y agua)

* A base de un consumo de 250 litros por año.

** Suponiendo una vida media efectiva total en el organismo de 11.5 días y una dosis por órgano de 50 mSv para la tiroides.

Es importante señalar que los valores de referencia elaborados por la OMS están destinados a ser aplicados a los productos alimenticios en los lugares en la forma en que sean consumidos por determinado grupo de la población.

Para la aplicación de estas recomendaciones, se toma en cuenta que en un accidente nuclear se liberan diferentes radioisótopos y que como consecuencia de esto las partes de la cadena alimenticia se contaminan, por lo tanto, para tomar en cuenta estas variables no debe sobrepasarse la siguiente expresión:

$$\sum \sum \frac{C(i,f)}{NID(i,f)} = 1$$

donde:

$C(i,f)$ = concentración de actividad del isótopo i en el alimento f

$NID(i,f)$ = nivel de intervención derivado del isótopo i en el alimento f

Los niveles se calculan aplicando la siguiente formula:

$$NID = \frac{NRD}{m * d}$$

donde:

NID = nivel de intervencion del isótopo

NRD = nivel de referencia de la dosis (Sv)

m = masa de los alimentos consumidos (Kg)

d = factor de la dosis por unidad de ingesta (Sv/Bq)

El calculo de los niveles se basó en las siguientes hipótesis de trabajo:

- 1.- El nivel de referencia de la dosis adoptado para una situación de accidente es de 5 mSv. Este valor corresponde a la dosis equivalente integrada efectiva de la mayor parte de los radionucleidos resultante de la ingestión durante el primer año posterior al accidente. Dado que las hipótesis adoptadas son muy moderadas, es improbable que, como resultado de la aplicación de los niveles siguientes, un individuo absorba una dosis mayor que una pequeña fracción de un mSv.
- 2.- 550 kg de alimento es la cantidad total de alimentos contaminados consumidos en un año, ó 700 litros de agua potable en un año, por persona.
- 3.- A efectos de los factores de la dosis por unidad de ingesta, los radionucleidos de interés (I-131, Cs-137, Cs-134, Sr-90 y Pu-239) pueden dividirse convenientemente en tres clases y aplicarse a la población en general:
 - a) La de aquellos cuyo factor de la dosis por unidad de ingesta es igual a 10^{-6} Sv/Bq por ejemplo el Pu-239 y otros actínidos.
 - b) La de aquellos cuyo factor de la dosis por unidad de ingesta es igual a 10^{-7} Sv/Bq por ejemplo el Sr-90 y otros radionucleidos que emiten radiaciones beta.
 - c) La de aquellos cuyo factor de la dosis por unidad de ingesta es igual a 10^{-8} Sv/Bq por ejemplo el Cs-134, Cs-137 y I-131.

Por ejemplo, el NID para el Cs-137 en leche se calculó considerando que la dosis permitida a miembros del público en general es de 5 mSv/año y que el consumo anual de leche es de 275 l/año. De esta manera la expresión para el cálculo es:

$$\begin{aligned}
 \text{NID (Cs-137)} &= \frac{\text{NRD}}{m * d} \\
 &= \frac{0.005 \text{ (Sv/año)}}{275 \text{ (l/año)} (1 \cdot 10^{-8} \text{ (Sv/Bq)})} \\
 &= 1 \text{ 818 Bq/l que redondeando es } 1 \text{ 800 Bq/l}
 \end{aligned}$$

Con respecto a los alimentos y leche para lactantes, se utiliza un factor de la dosis por unidad de ingesta de 10^{-5} Sv/Bq mientras que el I-131 se trata como los radionucleidos con un factor de la dosis por unidad de ingesta igual a 10^{-7} Sv/Bq.

Niveles relacionados con el comercio

Uno de los requisitos de intervención post-accidente más importante es la necesidad de establecer una orientación común sobre los criterios que deben regir la comercialización de productos alimenticios contaminados. La ausencia de estos criterios al sobrevenir el accidente de Chernobyl provocó una gran confusión en la comunidad internacional, la pérdida de la confianza pública y el levantamiento de barreras comerciales artificiales. Para que esta situación no se repita en caso de un futuro accidente, se ha procurado adoptar con cierta urgencia un enfoque internacional armonizado respecto de la determinación de niveles de intervención derivados. Si bien los principios básicos de intervención deberán ser comunes para el establecimiento de los niveles de control relacionados con el consumidor y con el comercio, es indispensable que cualesquiera criterios que se establezcan para controlar los productos alimenticios objeto de comercio internacional sean de fácil comprensión y aplicación por las personas encargadas de autorizar las expediciones en los puntos de importación o exportación que no son especialistas en protección radiológica.

En diciembre de 1986 en propuesta a peticiones de varios Estados Miembros de la FAO de asesoramiento sobre las medidas que deberían adoptarse con respecto a alimentos contaminados que son objeto de comercio internacional, un grupo de consulta de expertos de esa organización desarrolló niveles de acción internacionales interinos respecto de los radionucleidos en los alimentos (IRLAF). Se empleó el termino "interino" para facilitar el examen periódico y la posible revisión de dichos niveles a la luz de la experiencia y de otras recomendaciones de la FAO, la OMS y el OIEA. En la elaboración de estos niveles se adoptó un enfoque relativamente conservador con la finalidad de proporcionar un margen de seguridad amplio y lograr la mayor aplicación posible de los niveles para reducir al mínimo los trastornos innecesarios en el comercio internacional. La FAO recomendó aplicar los IRLAF a las expediciones internacionales de alimentos.

En una reunión celebrada en marzo de 1988 entre las Secretarías de la FAO, la OMS y el OIEA, se elaboró un enfoque mixto para el establecimiento de niveles relacionados con el comercio utilizando un procedimiento semejante al adoptado para determinar los niveles relacionados con el consumidor recomendados por la OMS. No obstante para que los niveles relacionados con el comercio se pudieran aplicar fácilmente en un marco reglamentador sencillo, el procedimiento se modificó a fin de incluir una cantidad mínima de niveles de control. Con la excepción de la leche y los alimentos para los bebés, el concepto de la OMS de categorías de alimentos separadas se ha reemplazado por el de un solo grupo genérico de alimentos con niveles de control basados en una cifra conservadora de consumo anual de alimentos de 550 kg por persona, todos los cuales se consideran contaminados. En julio de 1989 se presentaron los niveles recomendados a la 18ª reunión del Comité Ejecutivo de la Comisión del Codex Alimentarius, fueron aceptados y publicados en el suplemento 1 al vol. XVII del Codex alimentarius, 1990 y son los siguientes:

**NIVELES DE ORIENTACION PARA RADIONUCLEIDOS EN ALIMENTOS
OBJETO DE COMERCIO INTERNACIONAL APLICABLES DESPUES
DE UNA CONTAMINACION NUCLEAR ACCIDENTAL**

LECHE Y ALIMENTOS PARA LACTANTES

Factor de la dosis por unidad de ingesta (Sv/Bq)	Radionucleidos representativos	Nivel Bq/kg
10^{-5}	Am-141, Pu-239	10
10^{-7}	I-131, Sr-90	100
10^{-8}	Cs-134, Cs-137	1 000

Nota: Estos valores están tomados del Codex Alimentarius

ALIMENTOS PARA CONSUMO GENERAL

Factor de la dosis por unidad de ingesta (Sv/Bq)	Radionucleidos representativos	Nivel Bq/kg
10^{-6}	Am-141, Pu-239	10
10^{-7}	Sr-90	100
10^{-8}	I-131, Cs-134, Cs-137	1 000

Nota: Estos valores están tomados del Codex Alimentarius

REGULACIONES DE LA AUTORIDAD SANITARIA

Antes de la explosión que destruyó la unidad 4 de la central nuclear de Chernobyl el 26 de abril de 1986, en ninguna de las orientaciones internacionales publicadas en relación con las medidas de emergencia, ni en las medidas nacionales de planificación para situaciones de emergencia, se había tomado en cuenta el tipo de accidente capaz de dispersar rápidamente cantidades considerables de radionucleidos sobre extensas zonas de Europa y cantidades detectables en la mayor parte del hemisferio septentrional.

Las medidas adoptadas por las autoridades nacionales ante la liberación ocasionada por el accidente de Chernobyl fueron muy variadas, y oscilaron entre el simple refuerzo de los programas existentes de vigilancia radiológica ambiental, hasta la prohibición del consumo de determinados alimentos. La excesiva

ansiedad e innecesaria confusión resultante se debió a la diferencia en las medidas de protección que se aplicaron en los distintos países y entre ellos, así como a la ausencia de instrucciones coherentes y comprensibles para el público (sobre todo en lo tocante a la contaminación potencial de los alimentos y del medio ambiente, y a todo efecto o dosis de radiación resultante).

En México la Norma Técnica No. 316 que establece los límites máximos permisibles de los radioisótopos de Sr-90, I-131, Cs-total y Pu-239 para leche deshidratada de importación (publicada en el Diario Oficial del 25 de agosto de 1988.

Radioisótopo	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE (LMP) (Bq/Kg)	
	En leche producida en	En leche producida en
	países europeos	países no europeos
Sr-90	10	0
I-131	*	0
Cs-137	50	0
Pu-239	1	0

* Dada la vida media de este radioisótopo no es necesario fijar un límite máximo permisible para I-131

Los límites anteriores deberán cumplir con la condición:

$$\frac{C(\text{Sr-90})}{\text{LMP}(\text{Sr-90})} + \frac{C(\text{Cs-total})}{\text{LMP}(\text{Cs-total})} + \frac{C(\text{Pu-239})}{\text{LMP}(\text{Pu-239})} \leq 1$$

donde:

C = concentraciones reales en leche deshidratada de importación.

LMP = límites máximos permisibles para los radionucleidos.

6. MONITOREO DE RADIATIVIDAD EN ALIMENTOS

6.1 MUESTREO

La toma de muestras es el acto de seleccionar una determinada porción del medio ambiente , o un número de recipientes ó unidades de un determinado lote. Para que el muestreo sea efectivo deberá ser lo mas representativo posible, dando una medida o una característica estadística del todo, es decir que las repeticiones del proceso de muestreo (que coincidan en tiempo y espacio), deben dar un grupo de medidas cuya variación sea mínima.

Existen dos tipos de muestras: las selectivas y las objetivas

MUESTRA SELECTIVA:

Son muestras que se colectan para demostrar o documentar ciertas condiciones anormales o insatisfactorias que se haya observado en el medio o bien para contar con una unidad del alimento que se sospecha en mal estado, para someterla al análisis de laboratorio. Esto es aplicable a muestras ambientales, a una fábrica, al establecimiento de servicio de comidas ya preparadas o al mercado. A este tipo de muestras también se les denomina como muestras sesgadas, subjetivas, investigativas o reglamentarias.

En la toma de muestras selectivas el azar es innecesario e incluso inconveniente, el muestreo deberá contener las unidades que demuestren mas claramente el lote contaminado. Para este proceso selectivo, se deberan elegir un número suficiente de unidades que permitan demostrar lo que se ha encontrado en el lote, junto con unas cuantas unidades normales, y notificar la proporción de unidades contaminadas en el muestreo.

Cuando no existan instrucciones específicas, la norma general será colectar un número de muestras equivalente a la raíz cuadrada más una, del número de unidades que contenga el lote. Por regla general, cuando se trate de grandes cantidades de unidades se

deberan muestrear no menos de 12 ni más de 36 donde cada unidad deberá proceder de recipientes diferentes.

Cuando se trate de recipientes a granel deberá tomarse una muestra de hasta 2 kg de cada uno de ellos. Cada muestra deberá empaquetarse por separado y deberá hacerse todo lo posible para que el producto alimenticio de los recipientes originales no se contamine o que por cualquier otro motivo se vuelva inadecuado o insatisfactorio para utilizarlo como alimento. El recipiente deberá cerrarse debidamente y en una forma segura después de haber tomado la muestra.

Los productos fabricados en condiciones no homogéneas se someterán a un muestreo al azar.

MUESTRA OBJETIVA:

Son muestras que pueden tomarse rutinariamente de un medio de muestreo, de un lote de alimentos para una vigilancia al azar, recopilación de datos para fines específicos, o vigilancia para determinar tendencias de impacto ambiental. Estas pueden realizarse siguiendo un plan o programa de muestreo.

El muestreo objetivo deberá realizarse al azar, donde toda unidad debe tener la misma posibilidad de ser seleccionada como muestra. La mejor forma de lograrlo es utilizando tablas con números al azar, o seleccionando una muestra según un tiempo determinado en una cadena de producción.

Las muestras deben tomarse siguiendo un plan o programa. Por razones prácticas es preciso centrar el programa de muestreo en aquellas muestras que sean representativas del medio y que puedan tomarse con cierta facilidad.

El programa debe desechar las muestras que resulten redundantes o que no guarden relación con los fines de estudio, mientras que las que sean de interés se repetirán llegado el caso.

Se deben tabular los datos meteorológicos y geográficos, a la posibilidad de que existan correlaciones que expliquen las grandes variaciones que puede causar la radiactividad en una serie de muestras.

TAMAÑO DE LAS MUESTRAS

El tamaño de las muestras deberá ser suficiente para poder efectuar análisis repetidos, si fuera necesario. Las condiciones de las muestras al llegar al laboratorio deberán reflejar las condiciones existentes en el momento del muestreo.

6.2 PRETRATAMIENTO

El pretratamiento es el tratamiento que se les da a las muestras después del muestreo, es tan importante como el muestreo mismo, pues si la muestra no es tratada en forma adecuada, los resultados del análisis no serán confiables.

Una vez que la muestra que se va a analizar ha sido tomada, deberá ser protegida para evitar cambios que alteren su composición, ya que un frasco o una bolsa sucia o mal cerrada puede provocar un error importante en el análisis.

El pretratamiento de las muestras antes de ser contadas puede requerirse por varias razones:

- a) Para dar a la muestra la forma adecuada para su conteo, sin separar los radionucleidos de interés.
- b) Para distinguir los radionucleidos deseados, de otros que interfieren con las mediciones finales, debido a que producen una respuesta en el detector.

- c) Para incrementar la actividad específica, a fin de que los radionucleidos sean medidos con mayor sensibilidad o exactitud.
- d) Para reducir la autoabsorción en la matriz de la muestra en la medición de alfas y emisores beta puros y en fotones de baja energía.

En el pretratamiento de las muestras para conteo debe usarse la mínima cantidad de pasos, a fin de reducir la posibilidad de contaminación cruzada, los errores en el proceso y los costos.

Las muestras que no requieren separaciones químicas específicas restringen su preparación sólo para conteo total alfa, beta y gama y para espectrometría gama. El único requisito es la distribución uniforme de las sustancias radiactivas en la muestra, el mismo tamaño de muestra, el espesor y la configuración de cada grupo de muestras.

PRETRATAMIENTO DE MUESTRAS EN GENERAL

El proceso de pretratamiento de todo tipo de muestras para conteo se realiza en las siguientes etapas:

a) *Preparación preliminar:* Consiste en lavar, limpiar, picar, pesar, moler, eviscerar, cortar, separar partes comestibles, hervir, etc., y todas aquellas acciones que tienen por objeto caracterizar la muestra y hacerla más manejable en las siguientes etapas del proceso.

b) *Secado:* Tiene por objeto reducir el contenido de humedad de las muestras, ya sea a la temperatura ambiente del laboratorio o mediante secado en estufa hasta peso constante.

c) *Calcinación:* Consiste en la destrucción de la materia orgánica para obtener cenizas de donde se extraigan los radionucleidos deseados, en forma directa o con acarreadores, durante las separaciones radioquímicas.

d) *Disolución*: Es la etapa que completa el pretratamiento de las muestras, mediante la disolución de los residuos de la calcinación.

PRETRATAMIENTO DE ALGUNAS MUESTRAS DE ALIMENTOS

Preparación preliminar

Productos agrícolas:

Granos, frutas y verduras

- Pesar la muestra total que vaya a prepararse
- Separar las partes no comestibles y partes que no sean propias de la muestra y pesarlas.
- Anotar ambos pesos
- Si la muestra es de frutas o contiene una gran cantidad de agua, cortarla en trozos pequeños
- Pesar nuevamente la muestra y anotar su peso, colocarla en charolas y secar en estufa a 125°C durante 48 horas o hasta peso constante.
- Pesar la muestra seca y obtener su factor de humedad para poder calcular posteriormente su actividad en base húmeda

$$F_h = P_h / P_s$$

donde: F_h = factor de humedad

P_h = peso húmedo de la muestra (antes del secado)

P_s = peso seco de la muestra (después del secado)

- Guardar la muestra en frascos de polietileno de boca ancha o en bolsas de polietileno grueso.

Productos animales:

Carne de res

- Moler la muestra en un molino de carne previamente lavado
- Pesar la muestra y anotar el dato
- Colocar la muestra en una charola de vidrio refractario previamente pesada

Carne de pollo

- Separar las piezas
- Pesar la totalidad de la muestra y anotar el dato
- Colocar la muestra en una charola de vidrio refractario previamente pesada

Huevo

- Pesar la muestra total y anotar el dato
- Hervir la muestra durante 30 minutos
- Quitar el cascarón y pesar separadamente la parte comestible y no comestible, anotar ambos datos
- Colocar la parte comestible en una charola de vidrio refractario previamente pesada

Pescados

- Eviscerar la muestra, descamarla, separar las partes no comestibles, pesarlas y descartarlas
- Cortar las partes comestibles en trozos pequeños, colocarlos en charolas de vidrio refractario previamente pesadas

Mariscos

- Pesar las muestras para obtener su peso húmedo total
- Separar la parte comestible y no comestible. Para el ostión y el caracol se utiliza un instrumento punzocortante, para las jaibas la separación es manual.

- Pesar cada una de las partes y anotar los datos
- Colocar cada una de las partes en charolas de vidrio refractario previamente pesadas.

Secado

- Colocar en una estufa la charola con la muestra, secarla a una temperatura de 125°C durante 48 horas
- Calcular el peso neto de la muestra seca y anotar el resultado
- Si se quiere conocer la actividad de la muestra en base húmeda calcular el factor de humedad con la formula descrita anteriormente.

Calcinación

- Colocar la cantidad requerida de muestra en una charola de tamaño apropiado y secar nuevamente en la estufa a 125°C hasta peso constante
- Agregar a la muestra 1 ml de acarreador de Sr o Cs dependiendo de la separación radioquímica que deba realizarse.
- Colocar la muestra en un horno mufla y estabilizar la temperatura aproximadamente a 180°C . Aumentar la temperatura muy lentamente hasta 240°C en un tiempo de 8 horas, la temperatura en este rango es crítica ya que puede iniciarse la combustión rápida de la muestra (formación de flama y emisión de gran cantidad de humo), lo cual puede producir carbonización o perdida de la misma. Si se observa gran cantidad de humo, disminuir la temperatura.

Mantener los 240°C durante 5 horas, terminado este periodo, aumentar lentamente la temperatura hasta la ignición, después de eso se puede aumentar mas rápidamente hasta alcanzar los 320°C . Se debe tener cuidado, ya que en este intervalo de temperatura algunas muestras pueden presentar combustión

dependiendo de su contenido de grasas. Si no se presenta la combustión aumentar la temperatura más rápidamente hasta alcanzar los 485°C y mantener la muestra a esta temperatura durante 6 horas. Si terminada la calcinación final la muestra presenta una cantidad significativa de carbón (cenizas negras) agregar 5 ml de H_2O_2 al 31% y calcinar 2 horas mas a 485°C. Bajar la temperatura de la mufla y pasar la muestra a una estufa hasta que se enfríe.

- Continuar con el análisis radioquímico.

NOTA: Para la calcinación se requiere una cantidad de muestra seca de:

Tomate	140g	Frijol	500g
Maíz	1400g	Papaya	250g
Mango	750g	Carne de res	350g
Huevo	470g	Carne de pollo	170g
Huachinango	100g	Robalo	350g
Sierra	250g	Cazón	250g
Camarón	145g	Jaiba	150g
Cangrejo	45g	Ostión	71g

En caso de realizar análisis de espectrometría gama, las muestras molidas y secas se transvasan a un frasco Marinelli del tamaño apropiado previamente pesado. La transferencia se realiza en pequeñas porciones, golpeando el frasco sobre una superficie uniforme. Los frascos se llenan hasta el borde y se envían directamente a conteo.

Las muestras de leche para análisis de radioyodos no necesitan ninguna preparación si se analizan con resinas de intercambio iónico. Esta técnica es la mas recomendable pues evaporar la leche hasta sequedad total presenta muchos problemas e interferencias.

6.3 TRATAMIENTO (SEPARACION RADIOQUIMICA)

Una separación radioquímica es muy similar a una separación química, diferenciándose solo en que la cantidad de masa del radionucleido a ser separado es extremadamente pequeña. Por ejemplo un pCi de I-131 equivale a 7.82×10^{-15} mg de I-131 isotópicamente puro, por este inconveniente no es posible seguir operaciones normales que dependan de la concentración de la masa, por lo que se hace necesario su incremento, esto se realiza adicionando cierta cantidad de la forma inerte del radionucleido analizado, el cual es llamado acarreador y en su presencia podemos seguir las separaciones por los métodos normales. La adición de acarreador se basa en la hipótesis de que todo isótopo del mismo elemento tiene las mismas propiedades químicas. Otra ventaja del acarreador es que si adicionamos una cantidad conocida podemos evaluar el rendimiento de la separación.

Es importante mencionar que la separación radioquímica es insustituible para la detección de radionucleidos que solo son emisores beta, así como también para medir concentraciones muy bajas que no son alcanzadas por métodos directos.

Existen diferentes técnicas químicas que se pueden utilizar para la separación de radionucleidos, a continuación se describirán las más utilizadas:

Precipitación. Es una de las técnicas más comunes de separación química la cual se basa en la formación de un precipitado insoluble en un eluyente, el constituyente buscado puede quedar en el precipitado o en el eluyente, según su naturaleza. El precipitado puede ser separado por filtración o centrifugación.

La precipitación puede ser solo un paso a través del proceso, después de esto puede ser necesario disolver o reprecipitar el compuesto varias veces para su purificación.

Intercambio Iónico. Esta técnica de separación química es quizá la mas moderna y útil. Los materiales de intercambio iónico son resinas iónicas que intercambian iones por otros de valencia mayores. Comunmente se llena una columna de tamaño específico con la resina y la solución a separar, se eluye a través de ella. Los componentes se irán quedando en la columna, de acuerdo a su valencia predominante, esta columna puede fraccionarse físicamente y extraerse cada una de sus valencias.

Las resinas de intercambio catiónico retendrán los cationes en solución de la muestra y una cantidad equivalente del catión de la resina pasará a la solución. Si se utiliza una columna de intercambio aniónico, los aniones de la solución en muestra se intercambiarán con los aniones de la resina y estos últimos pasarán a la solución.

Extracción con solvente. Es una técnica muy valiosa como medio de separación de un componente o mezcla. El método está basado en la distribución desigual en el equilibrio de las sustancias que han de separarse, entre dos fases mutuamente insolubles.

En esta separación se utilizan dos fases que no son solubles entre si que son comunmente un solvente orgánico y uno acuoso, el componente a separar tendrá mayor afinidad hacia alguna de las dos fases y será en esta fase donde se encuentre al final de la extracción.

El líquido orgánico que se use para extracciones con disolventes deberá ser buen disolvente del soluto (o solutos) que se van a extraer. Después de agitarlo con la solución acuosa, las gotitas de líquido orgánico se unirán rápidamente y formarán una capa separada. Para que esto pueda ocurrir, el peso específico (densidad del líquido dividida entre la densidad del agua) deberá ser sustancialmente mayor o menor que la unidad.

A una temperatura dada, la relación de las concentraciones en equilibrio de una sustancia distribuida entre dos disolventes no miscibles en contacto, es constante. Esta constante es llamada coeficiente de distribución y es igual para concentraciones extremadamente bajas. El elemento extraído puede ocurrir en diferentes formas químicas, según varias condiciones, que pueden ser alteradas para permitir el control selectivo de la extracción.

Electrodeposición. La electrodeposición es una excelente técnica de separación que proporciona un medio rápido para depositar metales en concentraciones traza, directamente en una plancheta metálica (cátodo pesado previamente (electrodo negativo)) en forma muy pura y con altos rendimientos de recuperación. En esta técnica los metales son adheridos y depositados uniformemente sobre el área de la plancheta. Este es un método especial para medición de partículas alfa.

Cuando se ha terminado la deposición, se seca el cátodo y se pesa nuevamente. La cantidad de metal depositado se calcula por aumento en peso del cátodo.

Para calcular el tiempo de aplicación de la corriente se utiliza la siguiente fórmula:

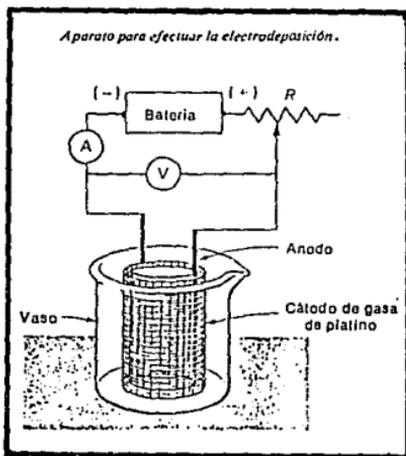
$$t = \frac{96,500 * (\text{gramos}) * (n)}{I * (\text{peso de la fórmula})}$$

donde:

gramos = gramos del metal que se desea obtener

n = número de electrones que participan en la reducción

I = intensidad de la corriente utilizada (coulombs/s)



En la determinación de actividad de cualquier muestra se deben de considerar una serie de factores involucrados al proceso de preparación y detección de muestras. Estos factores son:

- a) Tamaño de la muestra
- b) Rendimiento químico de la separación radioquímica
- c) Factor de crecimiento
- d) Factor de decaimiento
- e) Eficiencia de detección
- f) Factor de autoabsorción
- g) 2.2 (factor de conversión de dpm a pCi)

Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra es la cantidad de muestra analizada y se puede dar en unidades de peso seco o húmedo (Kg o g) o en unidades de volumen (l, ml o cm^3).

Rendimiento químico

El rendimiento químico de la separación radioquímica es el porcentaje de recuperación del acarreador agregado al inicio del proceso y se calcula gravimétricamente de la siguiente manera:

$$R = \frac{Pa}{Pb}$$

donde:

R = Rendimiento químico

Pa= peso del precipitado final de la separación radioquímica

Pb= Peso del acarreador del isótopo estable adicionado

El rendimiento químico también puede ser determinado por espectrofotometría de absorción atómica, especialmente en casos donde exista duda de contaminación con algún isótopo estable, por ejemplo es común que en la separación del estroncio queden residuos de calcio causando errores en la determinación gravimétrica.

Factor de crecimiento

Este factor es aplicable cuando el isótopo que se va a determinar tiene un hijo en equilibrio transitorio o equilibrio secular y su actividad se va a determinar a través del hijo.

El equilibrio transitorio se da cuando la vida media del radionucleido padre es ligeramente mayor que la vida media del radionucleido hijo, como por ejemplo:

Ba-140/La-140

donde el padre Ba-140 tiene una vida media de 8.0 horas

el hijo La-140 tiene una vida media de 0.8 horas

El equilibrio secular se da cuando la vida media del radionucleido padre es mucho mayor que la vida media del radionucleido hijo, como por ejemplo:

Sr-90/Y-90

donde el padre Sr-90 tiene una vida media de 29.0 años

el hijo Y-90 tiene una vida media de 64.1 horas

El factor de crecimiento para radionucleidos con equilibrio secular se calcula con las siguientes fórmulas:

$$F_c = 1 - e^{-\lambda \Delta t} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

donde

F_c = Factor de crecimiento

λ = constante de decaimiento

$T_{1/2}$ = vida media del radionucleido

Δt = tiempo transcurrido desde el inicio de la separación hasta el conteo

Factor de decaimiento

El factor de decaimiento debe considerarse solo cuando la vida media del radionucleido es relativamente corta con respecto al tiempo del proceso. En el caso del Sr-90 que tiene una vida media de 29 años es despreciable.

Las formulas para calcular el factor de decaimiento son:

$$F_d = e^{-\lambda \Delta t} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

donde

F_d = Factor de decaimiento

λ = constante de decaimiento

$T_{1/2}$ = vida media del radionucleido

Δt = tiempo transcurrido desde el inicio de la separación hasta el conteo

Eficiencia de detección

La eficiencia de detección se puede definir como la capacidad del detector para registrar un evento y se obtiene midiendo un estándar del radionucleido de interés con un número de desintegraciones por minuto conocido. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$E = \frac{\text{cpm}}{\text{dpm}}$$

donde:

E = eficiencia del equipo

cpm = cuentas por minuto registradas por el detector

dpm = desintegraciones por minuto del estándar

Factor de autoabsorción

El factor de autoabsorción se aplica básicamente a radionucleidos de baja energía en los que sus partículas beta son frenadas según el espesor másico del precipitado. Este factor se calcula mediante una gráfica preparada con estándares de actividad constante pero diferente espesor másico donde el 100% es el estandar con espesor másico de 0.

El espesor másico de cada precipitado se calcula con la siguiente fórmula:

$$Em = \frac{Pp}{A}$$

donde:

Em = Espesor másico del precipitado (=) mg/cm^2

Pp = Peso del precipitado (=) mg

A = Area del precipitado (=) cm^2

Finalmente el calculo de la actividad se realiza de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$A = \frac{\text{cpm muestra} - \text{cpm blanco}}{\text{factores de corrección}}$$

donde:

A = Actividad de la muestra (=) pCi/kg, pCi/l etc.

cpm muestra = cuentas por minuto de la muestra

cpm blanco = cuentas por minuto del blanco de reactivos

factor de corrección = son los factores involucrados en el análisis según el radionucleido utilizado

6.4 EQUIPO A UTILIZAR

Ya que se ha tratado la muestra en forma adecuada se utiliza el detector adecuado para cuantificar la radiación emitida por el material radiactivo

Los diferentes detectores de radiactividad están basados en los 3 principios siguientes:

- a) La recolección de iones producidos cuando las radiaciones atraviesan un gas.
- b) La transformación en pulsos de electricidad de la fosforescencia producida cuando las radiaciones son absorbidas por materiales especiales.
- c) El comportamiento de materiales semiconductores de corriente al ser atravesados por radiaciones.

Estos detectores se basan en el hecho de que el pasaje de una partícula energética a través de la materia produce ionización o excitación de los átomos o moléculas del detector. Con partículas cargadas, como electrones, protones, deuterones y partículas α , la energía se transfiere directamente a los átomos a lo largo de su trayectoria mediante interacción electrostática.

Con los rayos γ es menos directa la excitación o la ionización. Estos fotones pierden energía por dispersión de Compton, efecto fotoeléctrico o producción de pares. Son las partículas energéticas (electrones) las que causan ionización dentro del detector.

Las características principales de los detectores son contar con un sistema de electrodos donde los iones son recolectados, y un circuito a través del cual pasan los pulsos de corriente originados cuando los iones son atraídos hasta los electrodos por medio de una carga eléctrica establecida en ellos.

Uno de los medios más apropiados para realizar la recolección de los iones producidos es un gas.

Los detectores más utilizados son:

- 1) Detectores Geiger-Müller
- 2) Detectores proporcionales
- 3) Detectores de centelleo
- 4) Detectores semiconductores

Detectores Geiger-Müller

Consiste de una cámara metálica cilíndrica que contiene un gas a baja presión, y un hilo delgado, aislado del cilindro y situado a lo largo de su eje, Una de las ventanas extremas del contador es delgada para reducir la absorción de las partículas incidentes. Se mantiene una diferencia de potencial de unos 1000 V entre el cilindro y el alambre central, siendo el alambre positivo. Si una partícula ionizante entra a la cámara, los electrones liberados de las moléculas del gas a lo largo de su trayectoria adquieren suficiente energía mediante el campo eléctrico como para ionizar a otras moléculas de gas. Así, una partícula energética única que atraviese la cámara produce una avalancha de cargas, y entonces resulta un breve pulso de corriente. Este pulso se amplifica y se registra o se hace audible. El número de sonidos audibles (bip) es una medida directa de la cantidad de partículas energéticas que entran al contador.

Detector proporcional

En estos detectores, el sistema de platos paralelos de las cámaras de ionización para realizar las funciones de electrodos es reemplazado por un cilindro, cuya pared actúa como cátodo, y un delgado alambre central o una pequeña esfera en el centro del mismo que funciona como ánodo. Los detectores proporcionales son comúnmente operados a presión atmosférica usando una cámara a través de la cual fluye el gas ionizable compuesto por una mezcla de 90% de argón y 10% de metano (llamado gas P10). Una característica de estos detectores es que permiten colocar las muestras radiactivas dentro de la cámara, de modo que las radiaciones no tienen que atravesar ninguna capa de material antes de llegar al gas, lo que permite un aumento considerable en eficiencia al detectar partículas α y β^- .

Este tipo de detectores incluye junto al detector un módulo de amplificación, un analizador de altura de pulsos a fin de hacer posible los análisis de energía de la radiación, y un escalador que registre el número de pulsos que reciba por unidad de tiempo.

Detectores de centelleo

Son descendientes directos de la antigua pantalla fosforescente que usaron Rutherford y colaboradores, consiste de un cristal transparente, como NaI, y un tubo fotomultiplicador, dispositivo electrónico sensible que registra un pulso de corriente aun cuando sólo sea una partícula única la que choque con la superficie sensibilizada. Con excepción de la superficie en contacto con el fotomultiplicador, la superficie del cristal de yoduro de sodio está recubierta con una capa reflectora delgada. Cuando una partícula energética o un fotón (rayo γ ó rayo X) atraviesa el cristal de NaI, algunos átomos a lo largo de su camino se excitan y después decaen a su estado fundamental con emisión de luz visible. La magnitud del pulso de corriente del multiplicador es proporcional al número de fotones visibles generados por el paso de la partícula a través del contador de centelleo, y éste a su vez depende del tipo de partícula y de su energía.

Detectores semiconductores

Estos detectores se han hecho populares en las últimas dos décadas. Básicamente son empalmes con polarización inversa, y normalmente casi no llevan corriente. Sin embargo, si pasa radiación ionizante a través de la región deplataada del empalme se producirán pares de electrones y agujeros, los que permitirán el paso de un breve pulso de corriente inversa proporcional a la energía que se deposita. Los detectores son fáciles de manejar, dan la mayor resolución en energía, pero su volumen activo es bastante pequeño. El principio de operación de estos detectores está basado en la medición de la energía depositada por la radiación en el cristal (germanio hiperpuro).

6.5 ELECCION DEL EQUIPO DE DETECCION RADIATIVA

El punto más importante en la planeación del trabajo de detección radiactiva consiste en decidir que equipo de detección es el más adecuado, ya que en todos los casos es necesario obtener un reflejo correcto y reproducible de la radiactividad.

La elección del equipo adecuado se basa en el tipo y energía de la emisión.

Detección de partículas α

Para contar partículas α , la primera opción es un sistema de centelleo, usando un fósforo de ZnS activado con Ag, que admite un considerable intervalo de valores en la rapidez de desintegración, con la ventaja de no requerir una gran ganancia en la amplificación de los pulsos producidos. En esta forma la actividad de partículas α puede ser medida en la presencia de una cantidad 10^6 veces mayor de partículas β^- , sin interferencia significativa.

Los detectores semiconductores resultan útiles, particularmente para llevar a cabo análisis de energía de las partículas α . No obstante su precio, este tipo de detectores se ha convertido en casi insustituible para obtener espectros de energía de partículas que presentan alta ionización específica.

Otra alternativa muy conveniente es la de utilizar detectores proporcionales de flujo, usando gas P10, en los cuales la eficiencia en la detección es la mayor, aún cuando la resolución de los espectros de energía obtenidos sea menor que en los semiconductores.

Pueden ser utilizados detectores Geiger-Müller con ventanas muy delgadas, cuando no se requieren análisis de energía y la detección de las partículas α sea posible a pesar de lo reducido de su trayectoria.

Detección de partículas β^-

Para partículas β^- con energías máximas de 0.1 MeV, generalmente son usados Geiger-Müller con ventana delgada. Para energías máximas encima de 0.5 MeV es posible utilizar el Geiger de muestras líquidas. Para la detección con máxima eficiencia de partículas β^- de baja energía, existen 3 elecciones posibles:

- 1.- Detectores de flujo sin ventana, proporcionales o Geiger, para muestras sólidas.
- 2.- Detectores de flujo sin ventana, proporcionales o Geiger, para muestras gaseosas.
- 3.- Detectores de centelleo líquido, usando un fósforo interno, para muestras líquidas.

Detección de rayos γ

Los sistemas más apropiados para la detección de rayos γ son el de centelleo, usando un cristal de NaI activado con Tl. El tamaño del cristal es proporcional a su eficiencia, aún cuando mientras mayor sea aumente la radiación de fondo detectada, lo que resulta un inconveniente que puede resolverse en parte mediante blindaje o cuando se necesita una mejor resolución, los detectores de cristal sólido como el de germanio hiperpuro

El sistema más utilizado para detección de rayos gamma es la espectrometría gamma que es una aplicación de la detección por centelleo.

Espectrometría gamma

Un sistema de análisis por espectrometría gamma permite conocer la composición isotópica de forma cualitativa y cuantitativa de una muestra, sin necesidad de darle un pretratamiento químico y es el sistema que tiene la mejor resolución, es decir la capacidad de distinguir la presencia de 2 o más radionucleidos distintos.

Debido a que los radionucleidos emisores gamma emiten sus rayos en forma constante y de forma discreta, al identificar un rayo gamma es posible la identificación de dicho radionucleido, debido a que la energía de cada rayo gamma es característica de cada radionucleido y son como sus huellas digitales.

Un sistema básico de espectrometría gamma consta de : un blindaje de plomo de bajo fondo (5-10cm), un detector de germanio de 18-25% de eficiencia o de yoduro de sodio de 3"x3", un preamplificador muy cercano o integrado al detector, un amplificador, una fuente de alto voltaje, un multicanal (convertidor análogo digital) de 2048-4096 canales para detector de germanio y 256-512 para detector de yoduro de sodio, una computadora o un medio para grabar la información en cinta o disco, una impresora y opcionalmente una graficadora.

Detectores α y β de bajo fondo

La técnica de medición α/β total ha sido ampliamente usada en la determinación de radiactividad en muestras ambientales y alimentos. Está basada en el conteo de todas las emisiones α y/o β de la muestra sin considerar el tipo de radionucleido que las origina.

Un sistema α/β de bajo fondo consta de cuatro secciones importantes:

- 1.- Detectores y blindaje.
- 2.- Cambiador de muestras.
- 3.- Electrónica de procesamiento de señales.
- 4.- Computadora o equipo de análisis de datos.

Los sistemas α/β de bajo fondo se caracterizan por tener un fondo extremadamente bajo, que solo se logra mediante un arreglo de dos detectores y un circuito de anticoincidencia.

Los detectores se colocan uno sobre el otro, el detector inferior tiene una ventana muy delgada y la muestra se coloca directamente bajo este detector, llamado detector de muestra. El segundo detector llamado de guardia, no tiene ventana delgada y está colocado sobre el detector de muestra.

Cada detector tiene asociada su electrónica de procesamiento de señales analógicas:

El detector de guardia tiene asociada una fuente de alto voltaje, un preamplificador, un amplificador para dar amplitud suficiente a las señales y un discriminador de altura de pulsos. En esta línea de la electrónica se establece el nivel de discriminación para eliminar sólo el ruido electrónico.

El detector de muestra tiene asociada una fuente de alto voltaje, un preamplificador, amplificador y un discriminador doble, es decir, un discriminador que permite establecer dos niveles de comparación para seleccionar los conteos correspondientes a los eventos originados por radiación α y radiación β .

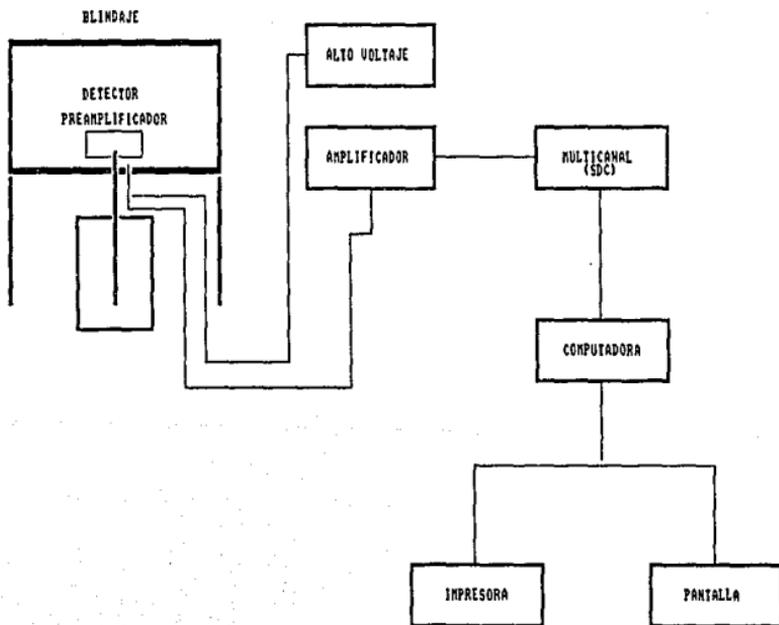
Los detectores proporcionales operan en forma de pulsos y se basan en el fenómeno de multiplicación gaseosa para amplificar la carga original generada dentro del detector.

La multiplicación gaseosa es lineal y por lo tanto la carga total colectada en cada interacción es proporcional al número original de pares de iones producidos por la radiación incidente.

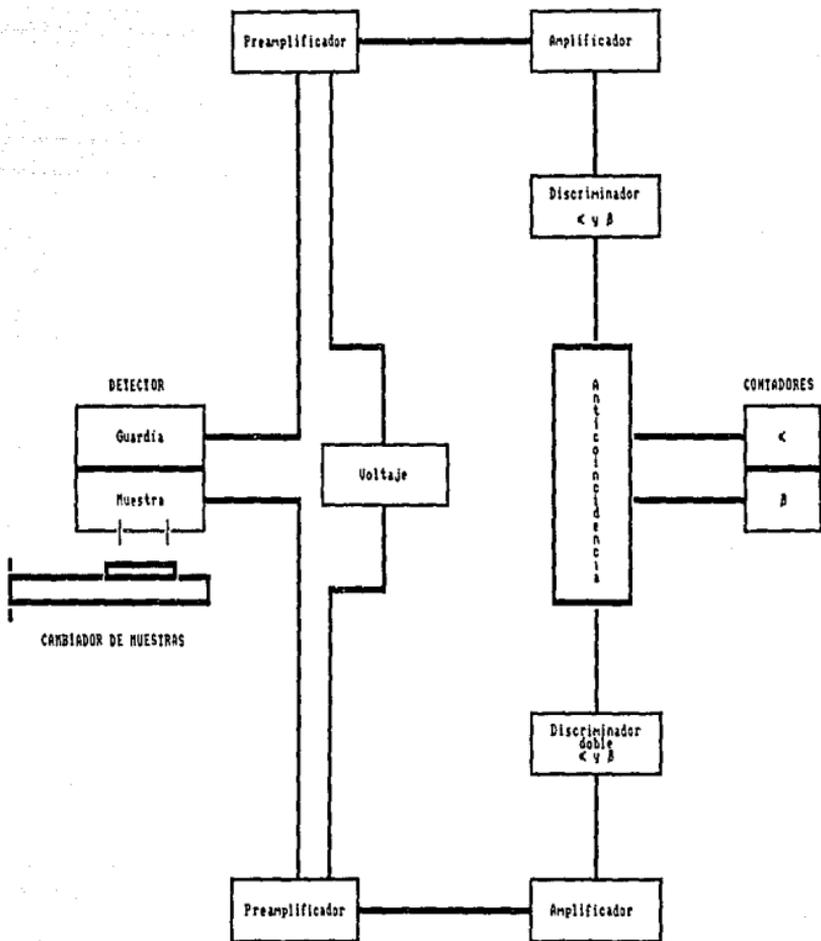
La multiplicación gaseosa requiere campos eléctricos intensos que se logran solamente con un diámetro muy pequeño del filamento del detector y un alto voltaje. Con estas condiciones, la región de multiplicación se confina a un volumen muy pequeño que rodea al filamento. Prácticamente todos los pares de iones primarios son formados fuera de la región de multiplicación y los electrones primarios simplemente se desplazan hacia esa región antes de que ocurra la multiplicación. Es decir, cada electrón está sujeto al mismo proceso de multiplicación independientemente de la posición en que fue originado y el factor de multiplicación es el mismo para todos los pares de iones originales.

Debido a que las partículas α tienen una masa muy grande comparada con la del electrón, su ionización específica es mayor y producen un mayor número de moléculas de gas ionizadas que a su vez dan lugar a señales con mayor amplitud y la meseta correspondiente empieza en un voltaje menor que para el caso de electrones (β).

Diagrama de un sistema de espectrometria gamma



Sistema alfa/beta de bajo fondo



7. TECNICAS DE MEDICION PARA RADIONUCLEIDOS EN LECHE

7.1 ANALISIS RADIOQUIMICO DE ESTRONCIO-90 EN LECHE

El estroncio es un elemento cuyas características químicas son semejantes a las del calcio, por lo que las rutas metabólicas que siguen son muy parecidas, de ahí la importancia del análisis de estroncio-90 en muestras con alto contenido de calcio, ya que de presentarse estroncio radiactivo, puede llegar al hombre siguiendo el metabolismo del calcio y depositándose en los huesos.

El estroncio ($_{38}\text{Sr}$) tiene dos isótopos importantes desde el punto de vista de riesgos biológicos que son el Sr-90 y el Sr-89, siendo ambos productos de fisión. Las vidas medias de estos nucleidos son de 29 años y de 50.5 días respectivamente.

La determinación de estroncio-90 en leche se realiza separando los cationes de la muestra y efectuando después una purificación del estroncio en forma de carbonatos. Los carbonatos se almacenan por un período de aproximadamente 15 días para permitir que el estroncio-90 alcance el equilibrio con su hijo, el ytrio-90 con quién exhibe un equilibrio secular. La detección se realiza sobre el Y-90.

Fundamento químico del método

El estroncio es un metal alcalino-térreo que presenta una valencia positiva de 2. Puede encontrarse formando sales con cloruros, nitratos, carbonatos, etc.

Las principales interferencias en una muestra de leche las constituyen el material orgánico y el alto contenido de calcio.

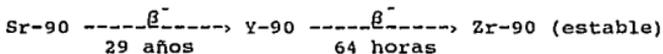
Para eliminar el material orgánico, la leche se pasa a través de una columna de intercambio catiónico del tipo Dowex-50 W-X8 forma sodio. Para evitar que el calcio que contiene la muestra saturé el intercambio de la resina, es necesario acomplejar el calcio presente en la leche antes de pasarla a través de la

columna, utilizando una solución de ácido etilendiamino tetra-acético disódico (Na_2EDTA).

Los cationes de la leche, incluyendo al estroncio son eluidos de la columna mediante una solución de cloruro de sodio. En un medio básico se precipitan los cationes en forma de carbonatos.

Debido a la gran cantidad de calcio en la leche, el precipitado de carbonatos aún incluye parte del calcio, a pesar de la quelación realizada con el Na_2EDTA . Este calcio residual se elimina con separaciones de ácido nítrico al 70%. Una vez que se ha eliminado el calcio, es necesario desechar otros cationes que puedan estar presentes en los carbonatos, tales como el bario, el radio y el hierro. El bario y el radio se eliminan precipitandolos como cromatos a un pH de 5. Por último se realiza una separación de hidróxidos en un medio básico con lo que se elimina el hierro y otros cationes como el cerio y el circonio.

Con estas separaciones se incluye la purificación del carbonato de estroncio donde se encontrará cualquiera de los isótopos del estroncio que tuviera la muestra de leche. Si se realiza una detección beta sobre el carbonato se obtendrá la actividad producto de la contribución del Sr-90 más la del Sr-89. Aprovechando el decaimiento del Sr-90 a Y-90 con quien presenta un equilibrio de tipo secular



se almacena el precipitado de carbonato de estroncio por un tiempo aproximado de 15 días, permitiendo que se alcance el equilibrio Sr-90/Y-90. En este momento se realiza una separación del ytrio presente en el carbonato de estroncio precipitandolo como oxalato de ytrio. Inmediatamente después de que se obtiene el ytrio se realiza la detección en un equipo proporcional de flujo.

La actividad del estroncio-90 se obtiene directamente del conteo del ytrio-90, ya que al momento de separar el ytrio del estroncio se encontraban en equilibrio. Si se sospecha la presencia de estroncio 89 en la muestra y se requiere conocer su actividad, debe realizarse una detección sobre el carbonato de estroncio al momento en que se obtiene, después se almacena, se separa el ytrio y se realiza la detección del Y-90. La actividad del Sr-89 se obtiene restandole a la actividad del carbonato de estroncio, la actividad del oxalato de ytrio y la fracción de ytrio-90 que haya crecido en el carbonato de estroncio.

Metodología

a) Preparación de la columna de intercambio iónico

- 1.- Montar la columna de intercambio iónico como se muestra en la figura
- 2.- Poner en la columna (de 3.5 cm de diámetro por 50 cm de largo) 170 ml de resina catiónica Dowex-50 W-X8 forma sodio de malla 50-100, previamente hidratada.
- 3.- Lavar la columna con 1 litro de agua destilada, eluyéndola al máximo, abriendo totalmente la llave de paso de la columna.
- 4.- Pasar a través de la columna 1 litro de NaCl 4N (para asegurar que toda la resina esté en forma de cloruros) a un flujo aproximado de 10 ml por minuto.
- 5.- Lavar la columna eluyendo 1 litro de agua destilada a flujo máximo.

b) Separación radioquímica

- 1.- Medir 1 litro de leche y transferirla a un vaso de precipitados de 2 litros, adicionar con exactitud 1 ml de acarreador de estroncio (aproximadamente 40 mg/ml). Agitar mínimo 10 minutos en la parrilla.

- 2.-Si en la muestra se va a realizar la separación radioquímica de bario, entonces adicionarle con exactitud 1 ml de acarreador de bario (aproximadamente 20 mg/ml).
- 3.-Iniciar la separación de la muestra blanco con 1 litro de agua destilada, adicionandole con exactitud 1 ml de acarreador de estroncio (aproximadamente 40 mg/ml)
- 4.-Adicionar 300 ml de solución acomplejante de EDTA disódico pH 5.6 agitar aproximadamente 10 minutos y ajustar el pH a 5.2 con solución buffer de acetato de amonio.
- 5.-Eluir la leche a través de la columna a flujo máximo y desechar el eluyente.
- 6.-Lavar la columna con agua destilada caliente (60 a 70°C) hasta que quede libre de residuos de leche, desechar los lavados.
- 7.-Pasar 1 litro de NaCl 4N a través de la columna a un flujo aproximado de 20 ml por minuto y coleccionar el eluyente en un vaso de precipitados de 2 litros.
- 8.-Adicionar 5 ml de NaOH 6N, agregar 100 ml de Na₂CO₃ 3N y calentar aproximadamente 30 minutos. Enfriar.
- 9.-Filtrar a través de un filtro de fibra de vidrio, disolver el precipitado con HNO₃ 6N en un vaso de precipitados de 250 ml. Evaporar a sequedad.
- 10.-Disolver el precipitado de nitratos con 5 ml de agua destilada, adicionar 10 ml de HNO₃ concentrado y 22 ml de HNO₃ fumante. Enfriar en baño de hielo aproximadamente 10 minutos con agitación ocasional. Centrifugar mínimo 5 minutos y descartar el sobrenadante.

NOTA: La óptima separación de estroncio y calcio se obtiene a una concentración de HNO₃ al 70%. En los casos necesarios se puede variar los volúmenes de ácido y agua destilada siempre y cuando se obtenga una concentración óptima.

- 11.-Repetir el paso numero 10 hasta que la cantidad de nitratos sea ligeramente mayor que la muestra blanco.
- 12.- Añadir al precipitado lentamente Na_2CO_3 3N hasta que ya no produzca efervescencia, adicionar 10 ml en exceso.
- 13.-Calentar en baño de agua aproximadamente 10 minutos con agitación ocasional, enfriar en baño de hielo, centrifugar mínimo 5 minutos y descartar el sobrenadante.
- 14.-Disolver el precipitado con HCl 6N, calentar en baño de agua y diluir a 10 ml con agua destilada.
- 15.-Adicionar 3 gotas de una mezcla de indicadores de verde de bromocresol/rojo de metilo y agregar NH_4OH 1N hasta el vire de color rojo a violeta. Añadir 5 ml de solución buffer de acetato de amonio pH 5 y agitar.
- 16.-Si al inicio del proceso no se adicionó acarreador de bario, entonces agregar 1 ml (aproximadamente 20 mg/ml) y 1 ml de $\text{Na}_2\text{CrO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 1N. Calentar en baño de agua aproximadamente 10 minutos con agitación ocasional. Enfriar en baño de hielo.
- 17.-Filtrar en filtro de fibra de vidrio y lavar el precipitado con 5 ml de solución buffer de acetato de amonio pH 5. Recibir el filtrado en un tubo de centrifuga de 50 ml, desechar el precipitado.
- 18.-Añadir 2 ml de NH_4OH concentrado y 5 ml de Na_2CO_3 3N. Calentar en baño de agua aproximadamente 10 minutos con agitación ocasional y enfriar en baño de hielo, centrifugar mínimo 5 minutos y descartar el sobrenadante.
- 19.-Disolver el precipitado con HCl 6N, diluir aproximadamente a 10 ml con agua destilada. Adicionar 2 gotas de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y 1 ml de acarreador de cerio y circonio (aproximadamente 10 mg/ml) y calentar en baño de agua aproximadamente 10 minutos con agitación ocasional.

- 20.-Enfriar en baño de hielo, agregar 2 gotas de fenoftaleina, añadir NH_4OH 6N hasta vire de color amarillo a rosa tenue. Anotar la hora y la fecha de la formación de hidróxidos como t_1 (inicio de crecimiento de Y-90).
- 21.-Filtrar en filtro de fibra de vidrio, lavar el precipitado con 5 ml de agua destilada y descartarlo. Recibir el filtrado en un tubo de centrifuga de 50 ml.
- 22.-Adicionar 5 ml de Na_2CO_3 3N,mezclar bien y calentar en baño de agua aproximadamente 10 minutos con agitación ocasional, enfriar en baño de hielo.
- 23.-Filtrar a traves de un filtro EPM 2000 (o equivalente) de 1 pulgada de diámetro, previamente pesado. Lavar con agua destilada y posteriormente con etanol, secar con lámpara, enfriar y pesar.
- 24.-Calcular el rendimiento químico gravimétrico de la separación de estroncio de la siguiente manera:

$$R_{\text{Sr}} = \frac{\text{PM}}{\text{PA}}$$

donde:

PM= peso del precipitado de carbonato de estroncio obtenido en el paso número 23 por diferencia de peso

PA= peso promedio del precipitado de carbonatos obtenido al precipitar una cantidad de acarreador igual al agregado en la muestra.

- 25.-Si en la muestra se va a determinar Sr-89 continuar inmediatamente con el paso número 26. Si solo se va a determinar Sr-90 continuar con el paso número 28.
- 26.-Montar el precipitado en una plancheta de plastico de 1 pulgada de diámetro, cubrir con papel mylar o equivalente y ajustar con anillo de plástico.

- 27.-Efectuar la detección en un detector proporcional de flujo. Anotar hora y fecha de detección como t_4 .
- 28.-Si se requiere efectuar la determinación del rendimiento químico de la separación de estroncio por absorción atómica, efectuarla sobre el precipitado obtenido en el paso número 23.
- 29.-Esperar el crecimiento de Y-90 aproximadamente 15 días a partir de t_1 .

c) Regeneración de la columna de intercambio iónico

- 1.- Desempacar la columna y lavar la resina con agua destilada caliente (60 a 70°C) hasta eliminar los residuos de leche.
- 2.- Empacar la columna y lavarla con 1 litro de agua destilada a un flujo aproximado de 10 ml por minuto.

d) Separación del Ytrio

- 1.-Disolver el precipitado de carbonato de estroncio en el que se ha dejado crecer el Y-90 con HCl 6N. Adicionar con exactitud 1 ml de acarreador de ytrio (aproximadamente 10 mg/ml) diluir con agua destilada hasta un volumen aproximado de 20 ml.
- 2.-Calentar aproximadamente 5 minutos en baño de agua, adicionar 2 gotas de fenoftaleína y agregar NH₄OH 6N hasta el vire de incoloro a rosa tenue. Anotar la hora y la fecha de la precipitación como t_2 (fin del crecimiento de Y-90).

NOTA: Los siguientes pasos deben realizarse lo mas rápido posible para disminuir el decaimiento del Y-90.

- 3.-Centrifugar mínimo 5 minutos y recuperar el sobrenadante en un vaso de precipitados de 100 ml.
- 4.-Disolver el precipitado con HCl 6N, diluir con agua destilada hasta un volumen aproximado de 20 ml y calentar en baño de agua aproximadamente 5 minutos.

- 5.-Adicionar 2 gotas de fenoftaleína y agregar NH_4OH 6N hasta el vire de incoloro a rosa tenue. Centrifugar mínimo 5 minutos y recuperar el sobrenadante al vaso de precipitados del paso número 3.
- 6.-Repetir los pasos número 4 y 5.
- 7.-Disolver el precipitado con HCl 6N y diluir a aproximadamente 20 ml con agua destilada, agregar 1 ml de solución saturada de ácido oxálico, ajustar el pH entre 2 y 3 con NH_4OH 6N y digerir aproximadamente 10 minutos en baño de agua.
- 8.-Enfriar en baño de hielo y filtrar a través de un filtro EPM-2000 o equivalente, de 1 pulgada de diámetro previamente pesado, lavar con agua destilada y posteriormente con etanol. Secar el filtro con lámpara y pesar.
- 9.-Calcular el rendimiento químico gravimétrico de la separación de ytrio de la siguiente manera:
$$R_v = \frac{PM}{PA}$$
donde:
 - PM = peso del precipitado del oxalato de ytrio obtenido en el paso número 8 por diferencia de peso.
 - PA = peso promedio del precipitado de oxalato de ytrio obtenido el precipitar varias veces una cantidad de acarreador igual a la agregada a la muestra.
- 10.-Montar el precipitado en una plancheta de plástico de 1 pulgada de diámetro y cubrir con papel mylar o equivalente y ajustar con anillo de plástico.
- 11.-Efectuar de inmediato la detección en un detector proporcional de flujo. Anotar la hora y la fecha de la detección como t_3 .
- 12.-Evaporar la solución obtenida en el paso número 4 hasta aproximadamente 20 ml, adicionar 5 ml de Na_2CO_3 3N. enfriar en baño de hielo y filtrar en un filtro de fibra de vidrio, lavar con agua destilada y posteriormente con etanol.

- 13.-Calcular la concentración mínima detectable (CMD) de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$CMD = \frac{(4.66) (S_b)}{(2.22) (E) (V) (F_d) (F_c) (R_V) (R_{Sr})}$$

$$F_d = e^{(-1.093 \times 10^{-2})(\Delta t)} \quad F_c = 1 - e^{(-1.093 \times 10^{-2})(\Delta t^*)}$$

donde:

- S_b = Desviación estándar del blanco
- E = Eficiencia de detección del Y-90
- V = Volumen de leche utilizado
- F_d = Factor de decaimiento del ytrio
- Δt = Tiempo transcurrido entre el fin del crecimiento del ytrio y el conteo t₁-t₂ (=) horas
- F_c = Factor de crecimiento del ytrio
- Δt* = tiempo transcurrido entre el inicio del crecimiento del ytrio y el fin del crecimiento del mismo t₁-t₂ (=) horas
- R_V = Rendimiento de la separación del ytrio
- R_{Sr} = Rendimiento de la separación del estroncio

- 14.-Calcular la actividad de Sr-90 en pCi/l si (4.66 * S_b) es menor a las cuentas por minuto netas de la muestra calculadas como:

$$cpm_n = cpm_r - cpm_b$$

donde:

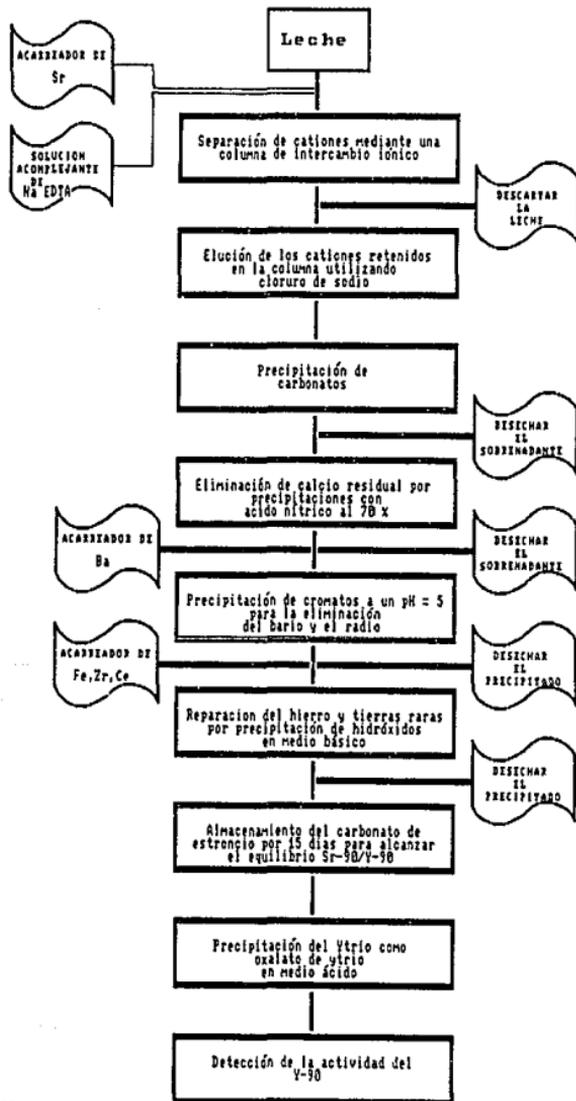
- cpm_n = cuentas por minuto netas.
- cpm_r = cuentas por minuto totales
- cpm_b = cuentas por minuto del blanco

$$ACTIVIDAD = \frac{cpm_n}{(2.22) (E) (V) (F_d) (F_c) (R_V) (R_{Sr})}$$

- 15.-Calcular la incertidumbre (I_c) debida al conteo como:

$$I_c = \frac{\sqrt{(cpm/T_c) + (S_b)^2}}{(2.22) (E) (V) (F_d) (R_V) (R_{Sr})}$$

Diagrama de flujo del analisis radioquímico de Sr-90 en leche



7.2 ANALISIS RADIOQUIMICO DE RADIOYODOS EN LECHE

El análisis de radioyodos en leche es de gran importancia debido a que una ruta crítica por la que el hombre puede ingerir yodo radiactivo es mediante la ingestión de leche. Esta ruta consiste en el depósito de los radioyodos sobre el pasto, que es ingerido por el ganado, quienes eliminan el yodo en la leche, pudiendo llegar así al ser humano concentrándose en la glándula tiroides; consecuentemente se producirá una dosis de radiación a este órgano al estar expuesto a radioyodos.

El yodo ($_{53}\text{I}$) tiene varios radioisótopos, pero el núclido más importante desde el punto de vista de riesgo biológico es el I-131 que decae por emisión de partículas beta negativas (β^-) y rayos gamma (γ), con una vida media de 8.04 días.

El análisis radioquímico de radioyodos en leche se realiza por intercambio aniónico, extracción con tetracloruro de carbono (CCl_4), precipitación como yoduro de cobre y finalmente se lleva a cabo la detección en un equipo proporcional de flujo ó en un espectrómetro gamma, según se requiera.

Fundamento químico del método

El yodo pertenece al grupo VII-A de la tabla periódica y forma parte de la familia de los halógenos. Puede presentar valencia -1,+1,+3,+5,+7, por lo que la química del yodo es compleja.

Las distintas formas en que puede presentarse el yodo son : yoduro (I^-), yodo elemental (I_2), hipoyodato (IO^-), yodato (IO_3^-) y peryodato (IO_4^-).

La leche, a la que previamente se le ha agregado un acarreador en forma de yoduro, se pasa a través de una resina de intercambio aniónico, tal como la Dowex 1x8 forma cloruro, en la que se retiene el yodo de la muestra, así como el acarreador. Para que el acarreador funcione adecuadamente, debe estar en la misma forma que el yodo presente en la muestra; para esto se tienen que

realizar una serie de reacciones de oxido-reducción que aseguren que ambos se encuentren en el mismo estado de oxidación. Para llevar a cabo esto se debe agregar un agente oxidante, como hipoclorito de sodio, que oxidará el acarreador y el yodo de la muestra a yodato y peryodato:



Por medio de un agente reductor, como el clorhidrato de hidroxilamina agregado en solución ácida, se reduce el yodato y peryodato a yoduro.

El yodo elemental puede extraerse con un solvente orgánico, es soluble en ellos, por ejemplo en tetracloruro de carbono o cloroformo. Una vez que se extrajo, puede separarse por reducción del yodo elemental a ión yoduro que no es soluble en el solvente.

Finalmente el yoduro precipitado se hace reaccionar con una solución de cloruro de cobre en medio ácido (pH = 2.5) dando como producto un precipitado de yoduro de cobre insoluble. Sobre este precipitado se realiza la detección de radioyodos.

Metodología

a) Preparación de la columna de intercambio iónico

- 1.- Montar la columna de intercambio iónico.
- 2.- Poner en la columna (de 2.5 cm de diámetro por 50 cm de largo) 50 ml de resina aniónica Dowex-1x8 (o equivalente) forma cloruros malla 20 a 50 previamente hidratada (1 ó 2 días).
- 3.- Lavar la columna con 1 litro de agua destilada, eluyéndola al máximo flujo (abrir 100% la llave de paso de la columna).

- 4.- Pasar a través de la columna 500 ml de cloruro de sodio 4N, para asegurar que toda la resina esté en forma de cloruros, a un flujo aproximado de 20 ml por minuto.
- 5.- Lavar la columna eluyendo 1 litro de agua destilada al máximo flujo.

b) Separación radioquímica

- 1.-Medir 3 litros de leche y colocarla en un vaso de precipitados de 4 litros, adicionar con exactitud 1 ml de acarreador de yodo (aproximadamente 20 mg/ml) y agitar aproximadamente 10 minutos con agitación magnética.
- 2.-Iniciar la preparación de la muestra blanco con 3 litros de agua destilada adicionandole con exactitud 1 ml de acarreador de yodo (aproximadamente 20 mg/ml) y continuar de la misma manera que la muestra.
- 3.-Eluir la leche a través de la columna a un flujo aproximado de 50 ml por minuto (si en la muestra se va a determinar Sr-89 ó Cs-137, guardar el eluyente, si no, descartarlo).
- 4.-Desempacar la columna y pasar la resina a un vaso de precipitados de 500 ml. Lavar con agua destilada caliente (aproximadamente 60°C) hasta que el agua de lavado salga transparente descartandola en cada ocasión, evitando tirar la resina.
- 5.-Añadir a la resina 150 ml de hipoclorito de sodio grado comercial (aproximadamente 5% de cloro activo) y agitar aproximadamente 10 minutos con agitación magnética, filtrar en un filtro de fibra de vidrio y recuperar el filtrado.
- 6.-Pasar la resina al vaso de precipitados y repetir el paso anterior.

- 7.-Agitar nuevamente la resina con 50 ml de agua destilada durante 5 a 10 minutos y filtrar. Combinar los filtrados en un vaso de precipitados de 2 litros y desechar la resina.
- 8.-Acidificar los filtrados con ácido nítrico concentrado hasta alcanzar un pH de 1, agitar hasta que termine la reacción (aproximadamente 30 minutos) y transferir a un embudo de separación de 1 litro.
- 9.-Agregar a la solución acidificada 100 ml de tetracloruro de carbono, 2 g de clorhidrato de hidroxilamina y agitar hasta que la solución se torne color violeta, liberando ocasionalmente la presión del embudo.
- 10.-Esperar a que se separen las fases y drenar la fase orgánica (fase inferior) a un embudo de separación de 250 ml.
- 11.-Repetir los pasos 9 y 10 con la fase acuosa (fase superior) y descartarla.
- 12.-Adicionar a la fase orgánica 50 ml de agua destilada y 1 ml de bisulfito de sodio 2M recién preparado. Agitar vigorosamente hasta que desaparezca el color violeta de la solución (aproximadamente 1 minuto).
- 13.-Esperar a que se separen las fases, descartar la fase orgánica (fase inferior) y transferir la fase acuosa a un vaso de precipitados de 50 ml, cuidando de no pasar residuos de la fase orgánica.
- 14.-Añadir con agitación 5 ml de cloruro cuproso 0.1M e inmediatamente ajustar el pH entre 2.5 y 2.7 con hidróxido de amonio 1N o ácido clorhídrico 1N. El pH en este paso es crítico por lo que se debe utilizar un potenciómetro).
- 15.-Esperar a que se sedimente el precipitado y filtrar utilizando un equipo de filtración millipore (o equivalente) de 2 pulgadas de diámetro, previamente pesado.

- 16.-Lavar el precipitado con agua destilada y etanol, secar con lámpara y pesar.
- 17.-Calcular el rendimiento químico gravimétrico de la separación de yodo de la siguiente manera:

$$R_i = \frac{PM}{PA}$$

donde:

- R_i = Rendimiento de la separación
 PM = Peso del precipitado del yoduro de cobre obtenido en el paso número 16 por diferencia de pesos.
 PA = Peso promedio del precipitado de yoduro de cobre obtenido al precipitar varias veces una cantidad de acarreador igual a la agregada a la muestra.

- 18.-Montar el precipitado en una plancheta de plástico de 2 pulgadas de diámetro, cubrir con papel mylar o equivalente y ajustar con anillo de plástico.
- 19.-Realizar inmediatamente la detección beta en un detector proporcional de flujo.
- 20.- Calcular la concentración mínima detectable de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$CMD = \frac{(4.66) (S_b)}{(2.22) (E) (V) (F_d) (R)}$$

$$F_d = e^{(-3.59 \times 10^{-3})(\Delta t)} \quad S_b = \sqrt{\frac{cpmb}{t_c}}$$

donde:

- CMD = Concentración mínima detectable en pCi/l
 S_b = Desviación estándar del blanco
 $cpmb$ = cuentas por minuto del blanco
 t_c = tiempo de conteo del blanco
 E = Eficiencia de detección
 V = Volumen de de leche utilizado en litros
 F_d = Factor de decaimiento del yodo-131

At = Tiempo transcurrido desde la fecha de muestreo hasta la fecha de conteo en horas.

R = Rendimiento de la separación

21.-Calcular la actividad de yodo en pCi si $(4.66 * S_b)$ es menor a las cuentas por minuto de la muestra calculadas como:

$$cpm_n = cpm_r - cpm_b$$

donde:

cpm_n = cuentas por minuto netas

cpm_r = cuentas por minuto totales

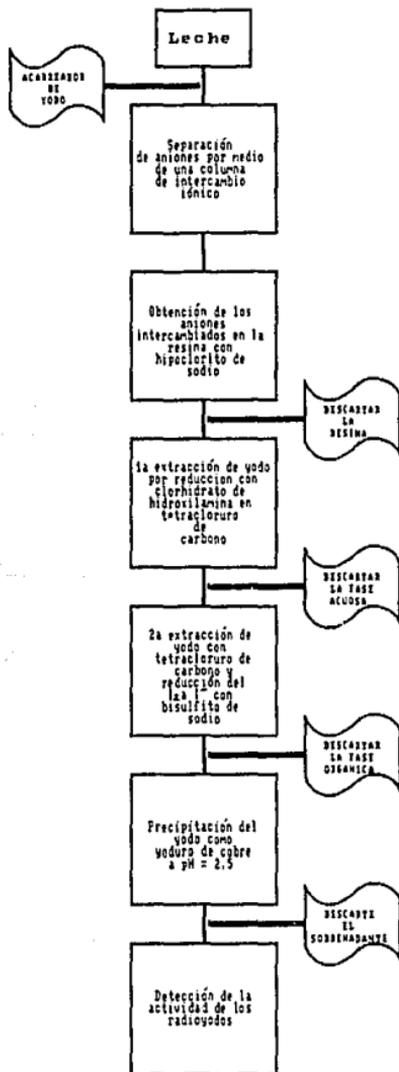
cpm_b = cuentas por minuto del blanco

$$\text{ACTIVIDAD} = \frac{cpm_n}{(2.22) (E) (V) (F_d) (R)}$$

22.-Calcular la incertidumbre (I_c) debida al conteo como:

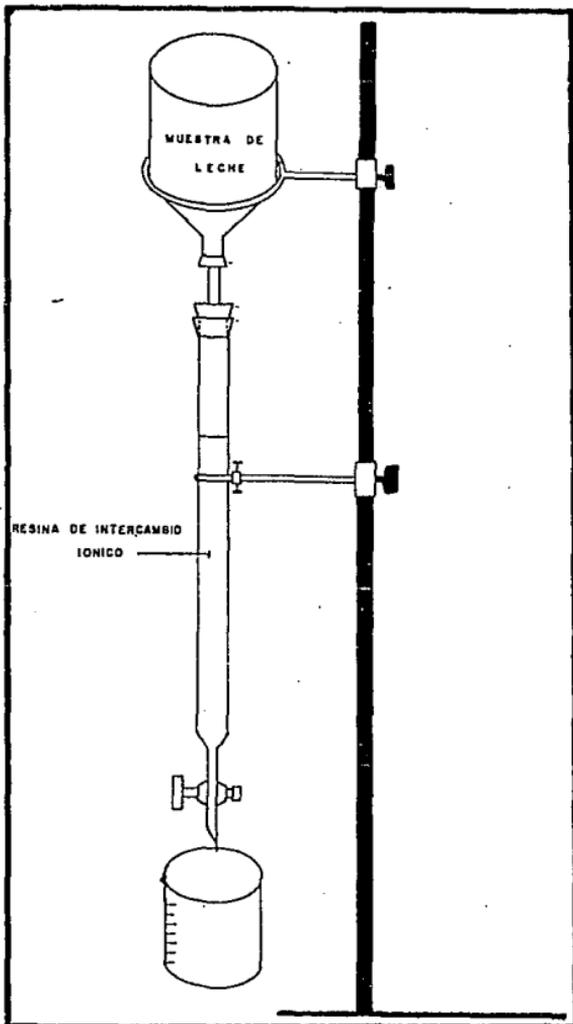
$$I_c = \frac{\sqrt{(cpm_r/T_c) + (S_b)^2}}{(2.22) (E) (V) (F_d) (R)}$$

Diagrama de flujo del análisis radioquímico de radioyodos en leche



211

DIAGRAMA DE UNA COLUMNA DE INTERCAMBIO IONICO
PARA SEPARACION DE ESTRONCIO Y DE YODOS



7.3 ANALISIS DE CESIO-137 Y DE CESIO-134 EN LECHE

La detección de Cs-137 y Cs-134 en la leche se obtiene analizando la leche directamente, es decir, sin ningún retratamiento por medio de espectrometría gamma.

La espectrometría gamma es un método analítico de muestras radiactivas con mayor resolución, es decir, con la mayor capacidad de distinguir un radionucleido de otro.

Para que el sistema de espectrometría gamma pueda ser un método cualitativo y cuantitativo debe de estar correctamente calibrado. Para dicha calibración es recomendable utilizar 1 o varios "patrones" o "estándares" de actividad y composición conocida y certificada, trazables a NBS (National Bureau of Standards). Las energías de los fotopicos deben de estar dentro de un rango de 80 a 2000 KeV por lo menos.

Existen dos calibraciones básicas: la de energía y la de eficiencia.

La calibración de energía consiste en que los fotopicos de los radionucleidos aparezcan en el canal adecuado, el cual se selecciona previamente dependiendo del equipo. Por ejemplo si se utiliza un multicanal con 2000 canales y se desea tener un espectro con un rango de energía de 0 a 4000 KeV, se tiene una relación de 2KeV/canal, el fotopico del Cs-137 deberá aparecer en el canal 330 aproximadamente, para corregir esto se utiliza el amplificador.

Utilizando una fuente con 2 o más fotopicos (1 o más radionucleidos), se puede determinar la ecuación de linealidad del sistema y la ecuación puede ser la siguiente:

$$\text{ENERGIA} = (\text{N}^\circ \text{ de canal} * \text{pendiente}) + \text{ordenada al origen}$$

La calibración de eficiencia consiste en conocer el número de eventos que logra captar el sistema con una geometría que se utilizará para contar las muestras. Las mejores geometrías son los botes Marinellis. Para la determinación de eficiencia es necesaria una fuente radiactiva con composición y actividad conocida, donde la eficiencia está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{EFICIENCIA} = \frac{\text{eventos netos del fotopico}}{(2.22)(\text{actividad pCi})(\text{tiempo de conteo})(\text{abundancia del estándar})}$$

Una vez que el sistema ha sido calibrado correctamente, es importante determinar el fondo de blindaje (background).

Entre más bajo sea el fondo de blindaje, menor será la interferencia que provoquen en el cálculo de los límites inferiores de detección de radionucleidos artificiales además de los naturales.

Metodología

a) Calibración de energía

- 1.- Adquirir un espectro de una fuente de Co-60 y Cs-137
- 2.- Anotar la ganancia fina y gruesa del equipo y los canales donde aparecen los fotopicos indicados, (0.5KeV/canal para el 7500 y 0.25 Kev/canal para el 918.)
- 3.- Obtener la diferencia entre los canales (ΔC) y anotarlo.
- 4.- Variar la ganancia fina y gruesa del amplificador.
- 5.- Repetir los pasos 1, 2, 3 y 4, hasta que el canal y ΔC obtenida sea lo más cercano posible al canal y ΔC teóricos.
- 6.- Utilizando papel milimétrico y el último espectro adquirido, graficar los canales donde aparecen los fotopicos (eje x) y su respectiva energía (eje y).

- 7.- Trazar una línea recta que pase por los puntos y se intercepte con el eje y.
- 8.- Seleccionando dos puntos de la recta, obtener la pendiente (m) y ordenada al origen.
- 9.- En caso de que la ordenada al origen no fuera cero, se podría corregir con los controles de "level zero".
- 10.- Obtenida la ecuación de la recta, el sistema está calibrado por energía, y para obtener la energía de algún pico desconocido sólo se tendrá que extrapolar o interpolar, gráficamente o utilizando la ecuación.

b) Calibración de linealidad

- 1.- Adquirir el espectro de un estándar mixto (Co-60, Cs-137, Ba-133, Bi-207 y Eu-152), obtener los principales fotopicos del espectro, y obtener un listado de la energía que le corresponde en KeV ya sea utilizando la ecuación o la gráfica obtenida en el paso anterior.
- 2.- Realizar una tabla comparando la energía real (KeV) y la energía observada (KeV). Obtener la diferencia entre la energía real y la observada en la misma tabla (E.real - E.observada).
- 3.- Graficar E.real - E.observada de cada fotopico en función de la energía.
- 4.- Trazar una línea tratando que pase por la mayoría de los puntos.

c) *Determinación del FWHM.*

(Anchura total a la mitad de la máxima altura)

- 1.- Con el listado de las cuentas en cada canal del pico de 1332.5 KeV de Co-60 graficarlos en el eje y vs. el canal correspondiente en el eje x.
- 2.- Unir los puntos y determinar el valor máximo.
- 3.- Trazar una recta horizontal a la altura de la mitad del máximo.
- 4.- Determinar la anchura de la recta trazada, en energía (KeV).

d) *Calibración de eficiencia.*

- 1.- Utilizando el listado de fotopicos de un estándar mixto o el espectro de un estándar mixto calcular la eficiencia para los diferentes picos.
- 2.- Graficar la eficiencia de cada fotopico (eje y) vs la energía (KeV).
- 3.- Trazar una línea recta, tratando que pase por la mayoría de los puntos.
- 4.- Para conocer la eficiencia de algún fotopico desconocido, sólo se tendrá que interpolar o extrapolar en la recta obtenida.

e) *Conteo de la muestra*

- 1.- Una cantidad conocida en peso o volúmen de la muestra se contará a la misma geometría que el estándar.

f) Interpretación de espectros

En forma general la ecuación para calcular la actividad específica es:

$$\text{ACTIVIDAD} = \frac{\text{cpm}_n - \text{cpm}_f}{(\text{pCi/PoV}) (2.22) (\text{PoV}) (E) (\text{Ir}) (Y) (e^{-\lambda \cdot t})}$$

donde:

cpm_n = cuentas por minuto netas

cpm_f = cuentas por minuto fondo

PoV = Peso ó volumen

E = Eficiencia

Ir = Intensidad ó abundancia gamma

Y = Rendimiento radioquímico

λ = Ln 2/vida media

t = Tiempo transcurrido entre muestreo y análisis

8. GARANTÍA DE CALIDAD

Para asegurar que las mediciones efectuadas en el laboratorio son razonablemente válidas, se requiere que éste tenga un programa de calidad. Este programa se debe desarrollar para identificar deficiencias en los procesos de muestreo, análisis y reporte de resultados para que se puedan tomar las acciones correctivas correspondientes, y para demostrar la validez de las mediciones realizadas.

Por garantía de calidad se entiende todas aquellas acciones planeadas y sistemáticas que son necesarias para asegurar que los resultados generados por el laboratorio son confiables, y por control de calidad, las acciones de garantía de calidad que proporcionan un medio para controlar y evaluar, como los procesos, equipos o sistemas que se usan en el laboratorio y cumplen con los requerimientos preestablecidos. De esta forma, la garantía de calidad incluye el proceso de control de calidad.

El programa debe cubrir todas las etapas del monitoreo desde el muestreo y preservación de las muestras, transporte, recepción y preparación, análisis, medición de actividad, reducción de datos y reporte de los mismos. También se requiere de un control en la documentación para asegurar que se guarden todos los registros y documentos aplicables para evitar pérdidas de información y facilitar su manejo.

Un programa de garantía de calidad del laboratorio comprende los siguientes aspectos:

- a) Elaboración de un manual de laboratorio en el que se establecen los procedimientos, instrucciones y métodos para conducir los análisis.
- b) Elaboración de un programa de control de calidad para verificar el buen funcionamiento y calibración de los instrumentos de medición y la reproductibilidad de los análisis realizados.

- c) Mantenimiento de un archivo de trabajo que confirme la ejecución de los análisis mediante el almacenamiento de documentos y registros que acrediten las actividades desarrolladas, permita rastrear cualquier valor generado, ayude a visualizar tendencias de cambio y permita la optimización de técnicas y métodos.

El programa de control de calidad en el laboratorio comprende tres aspectos:

a) *Materiales estándares de referencia*

Todos los sistemas de detección que se usan para la medición de actividad en el laboratorio se calibran contra fuentes estandarizadas, obtenidas a partir de soluciones radiactivas que cuentan con certificados de calibración expedidos por instituciones de metrología reconocidas internacionalmente. Estas fuentes de calibración generalmente se usan para determinar la "Eficiencia de conteo" de radionucleidos específicos o en el caso de espectrómetros gamma para determinar la "Eficiencia de conteo" en función de la energía de los rayos gamma emitidos. La "Eficiencia de conteo" se usa posteriormente para convertir el conteo de la muestra a concentración del radionucleido. En los casos en que se detectan radionúclidos naturales, las fuentes de calibración pueden prepararse gravimétricamente a partir de reactivos químicos comerciales de pureza analítica, por ejemplo el KCl puede usarse para preparar fuentes de calibración de K-40 para usarse en las mediciones de actividad beta total o espectrometría gamma.

Para obtener la eficiencia de equipos cuando se efectúan mediciones de radionucleidos de vida media corta, es impráctico e incostrable mantener continuamente soluciones calibradas en el laboratorio, en este caso se usan radionúclidos de vida media larga, a condición de que su respuesta ante el equipo sea similar y por lo menos bianualmente, se efectúe una calibración simultánea

con el radionucleído original, de esta manera las mediciones subsiguientes pueden corregirse por esta relación en el momento de efectuar la detección.

Todas las fuentes de calibración que se preparen deben en lo posible, tener las mismas características de las muestras para las que se requiere el factor de eficiencia (geometría, materiales de sostén, composición química, espesor másico, etc.).

b) Muestras de control de calidad

Este punto es uno de los más importantes para mantener la calidad en un programa de mediciones radiactivas ya que proporciona un medio de determinar cuantitativamente tanto la precisión como exactitud de los análisis. Comprende dos grandes categorías (1) Muestras intralaboratorio y (b) muestras extralaboratorio.

Dentro de las muestras intralaboratorio se tiene: las muestras duplicado, las muestras marcadas y las muestras blanco. Las muestras duplicado proporcionan un medio para determinar la precisión. Las muestras marcadas a las cuales se les ha añadido una cantidad conocida de actividad o cuya actividad es conocida, nos proporcionan una medida de la exactitud. Los blancos sirven para detectar y medir contaminación radiactiva durante el proceso analítico, la cual suele ser una fuente considerable de error en los laboratorios radioanalíticos especialmente cuando se realizan determinaciones de muy bajo nivel de actividad, además, las mediciones de blancos proporcionan información acerca de las características del fondo, especialmente cuando se trata de muestras ambientales.

El 10 % de las muestras se muestrean y analizan por duplicado.

En lo referente a las muestras extralaboratorio, es la participación del laboratorio en programas de intercomparación donde se analizan y miden muestras contra laboratorios independientes y de prestigio reconocido. Con los análisis de muestras de intercomparación es posible detectar errores que no se

podrían detectar con las muestras intralaboratorio y además proporcionan la confianza sobre las mediciones efectuadas.

c) Verificación del buen funcionamiento de los equipos y sistemas de medición del laboratorio

Además de la calibración de los sistemas de medición se debe verificar su buen funcionamiento, mediante la determinación de parámetros clave para su operación, como son el fondo, su respuesta a la radiación, etc. con una frecuencia preestablecida y los resultados graficados en una carta de control.

ARCHIVO DE TRABAJO

Toda la información que se genera durante el desarrollo de los análisis queda documentada en formas de trabajo y en formas de reporte, las que después de ser generadas y revisadas permanecen en el archivo de trabajo. Estos registros cubren los siguientes aspectos:

- a) Muestreo y preparación de muestras.
- b) Análisis y medición de actividad.
- c) Resultados y resúmenes de información.
- d) Registros de control de calidad en instrumentos.
- e) Registro de muestras de control de calidad.
- f) Calibraciones y estandarizaciones de equipo.

Los registros finales de los análisis y las formas de resúmenes y reportes se mantienen en un archivo maestro y se graban en cinta magnética con lo cual se tiene un archivo de respaldo de los resultados obtenidos y facilita el análisis estadístico de los mismos.

9. CONCLUSIONES

De lo expuesto en este trabajo podemos ver que es necesario el monitoreo de radiactividad en los alimentos tanto locales como importados, ya que éste es otro tipo de contaminación que se puede presentar en los mismos, aún cuando no se tengan indicios de algún accidente nuclear.

Es importante que todos los países cuenten con el equipo, las técnicas adecuadas y personal capacitado para este monitoreo, por que un accidente o liberación nuclear, puede ocurrir en cualquier momento, ya que cada vez son más los países que cuentan con plantas nucleares y aunque se extremen las medidas de seguridad, no están exentos de algún accidente que provoque la liberación de radionucleidos al ambiente y así lleguen a los alimentos y los consuma el hombre. En este caso, los países vecinos o alejados del lugar del accidente, podrán cuantificar la concentración de la radiactividad en los alimentos y así establecer si están aptos para su consumo.

Como se pudo observar en este trabajo la mayoría de los alimentos cuentan con elementos radiactivos de origen natural y artificial, que aunque están en bajas concentraciones, es importante que se analicen para verificar que estas concentraciones no aumenten y se encuentren dentro de los límites permitidos para su consumo.

En este trabajo se muestran las técnicas para medición de radionucleidos en la leche, se tomó este alimento ya que es uno de los más consumidos y con gran comercio internacional, además que es consumido básicamente por la población infantil, en la cual los efectos que causa la radiación son mayores. Como se pudo observar sólo en caso de que ocurra un accidente en el que se liberen radionucleidos como Sr, I, Cs o Pu se podría tener leche contaminada en algunos casos que causaría daño a la población y que, por lo tanto, no se pueda consumir.

También se hizo evidente en este trabajo la necesidad de armonizar los criterios para reglamentar la presencia de productos alimenticios contaminados en el comercio internacional ya que existe suficiente terreno común para apoyar los criterios de intervención propuestos por organismos internacionales OMS, FAO y aceptados en el CODEX Alimentarius. Al analizar estos criterios debe tenerse en cuenta los niveles de radionucleidos naturales presentes en los alimentos y materiales del medio ambiente. Estos niveles indican claramente lo engañoso que es adoptar niveles muy bajos y reales como base para el control de importación y exportación de alimentos. Por ejemplo el hombre adulto tiene incorporada una radiactividad natural de 5 000 Bq. La leche, por un radionucleido artificial el K-40 tiene 50 Bq/lt y sería necesario ingerir 400 000 Bq de Cs-137 para que un individuo recibiera la dosis máxima permisible de 5 mSv/año.

Los criterios genéricos simplificados presentan la desventaja de que hay que atribuir valores más conservadores a algunos de los parámetros establecidos, que lo que de otro modo, sería necesario por estrictas razones de protección radiológica. Aunque este enfoque encarezca el costo de protección, tal vez se considere aceptable si se compara con los beneficios que reporta la armonización de los criterios de control en el comercio internacional. Su aplicación, en caso de ocurrir algún accidente nuclear en el futuro, contribuiría a evitar que hubiera confusión, preocupación y pérdidas económicas.

10. BIBLIOGRAFIA

1. Adams N., Hunt B.W. and Reissland J.A.; "Annual limits of radionuclides for workers"; London, 1978
2. Barlett B.O., Middleton L.J., Milbourn G.M. and Squire H.M.; "Survey of radioactivity in human diet and experimental studies, report for 1960"; Letcombe, Agricultural Research Council; N.Y., 1960
3. Beck, H.L. et al; "Perturbations in the natural radiation environment due to the utilization of coal as an energy source"; Vol.2; USDOE; Washington, D.C., 1980
4. Blatt Frank J.; "Fundamentos de Física"; tercera edición; Prentice-Hall hispanoamericana, S.A.; México, 1991
5. Bragg J.W.; "Ionization Chambers"; Academic Press; N.Y., 1982
6. Bryant P.M.; "Derivation of working limits for continuous release rates of iodine-131 to atmosphere in a milk producing area"; Health Phys; N.Y., 1964
7. Cabrera, M.L.; "Cursos del Diplomado de Actualización a Profundidad en Seguridad Radiológica"; Fac. Química, UNAM; México, 1989
8. Cervini A.; "Manual de seguridad radiológica"; México, 1983
9. CIPR; Publicación 2; "Recommendations: ICRP report of committee 2 on permissible dose for internal radiation 1959"; Pergamon Press; Oxford, 1960
10. CIPR; Publicación 10; "Evaluation of radiation doses to body tissues from internal contamination due to occupational exposures"; Informe del Comité No. 4 de la CIPR; Pergamon Press; Oxford, 1968

11. CIPR; Publicación 10a de la CIPR; "The assesment of internal contamination resulting from recurrenrt or prolonged uptakes"; Informe del Comité No.4 de la CIPR; Pergamon Press; Oxford, 1971
12. CIPR Publication 23; "Reference man: anatomical, phisiological and metabolic characteristics"; Pergamon Press; Oxford, UK 1975
13. CIPR; Publicación 26; "Recommendations of the International Commision of Radiological Protection"; Pergamon Press; Oxford y N.Y., 1977
14. CIPR Publication 30; "Limits for intakes of radionuclides by workers"; Pergamon Press; New York, 1982
15. CIPR; Publicación 35; "General principles of monitoring for radiation protection of workers"; Informe del Comité no. 4 de la CIPR; Annals of the ICPR, Vol9, No.4; Pergamon Press; Oxford, 1982
16. CIPR; Publicación 38; "Radionuclide transformations: Energy and intensity of emission"; Annals of the ICPR, Vols 11 al 13; Pergamon Press, Oxford, 1983
17. CIPR; Publicación 40; "Publication of the public in the event of major radiation accidents: principles for planning"; Pergamon Press; Oxford y N.Y., 1984
18. CIPR; Publicación 54; "Individual monitoring for intakes of radionuclides by workers: Design and interpretation"; Informe del Comité No.4 de la CIPR; Annals of the ICPR, Vol.9, No.4, Pergamon Press: Oxford, 1988
19. Chase, G.D. y Rabino Witz, J.L.; "Principles of radioisotope methodology"; Burgess Publishing company; 1966

20. Cohen Bernald L.; "Variation of Radon in U.S. homes correlated with house characteristics, location and socioeconomic factors"; Health Physics 60/5; 1991
21. Choppin G. y P. Bishop; "Nuclear chemistry theory and applications"; Pergamon Press; Oxford, Nueva York, 1980
22. Colsher C.S., Quinn D.J. and Thompson S.E.; "Transfer coefficients for the prediction of the dose to man via the forage cow-milk pathway from radionuclides released to the biosphere"; UCRL-51939; N.Y., 1977
23. Edward, E. Pochin; "Estimation de L'Exposition de la Population"; Organisation de Coopération et de Développement Economiques; Paris, 1976
24. Eichholz, G.G. and Poston, W.J.; "Principles of Nuclear Radiation Detection"; Ann Arbor Science; Michigan, 1979
25. Eisebund M.; "Environmental Radioactivity"; Academic Press; Tercera edición; N.Y., 1987
26. Emmerson, B.W.; "Intervención para la protección de la población tras un accidente nuclear. Control de la distribución y el consumo de alimentos contaminados"; Boletín OIEA,3; 1988
27. Emmerson, B.W.; "The development of internal levels for protection of the public in the event of a major nuclear accident: past, present and future"; Proceedings of the International Conference on radiation protection in Nuclear energy; Sidney, Abril 1988, OIEA
28. FAO; "Limits for radionuclide contaminations of foods"; Report of the expert consultation on recomended; Roma, 1987

29. Fletcher J.F. and Dotson W.L.; "Hermes a digital computer code for estimating regional radiological effects from the nuclear power industry"; HEDL-TME; N.Y., 1971
30. Garner, R.J.; "Transfer of radioactive materials from the terrestrial environment to animals and man"; Chemical rubber Co. Ltd; Cleveland, Ohio, 1972
31. Glasstone Samuel and Jordan Walter; "Nuclear power and its environmental effects"; La Grange, Park III; N.Y., 1988
32. Gray Harry B., Haight Gilbert P. Jr.; "Principios básicos de química"; Ed. reverté; México, 1883
33. Hall, Eric J.; "Radiation and life"; Pergamon Press.; Segunda Edición; N.Y., 1984
34. Handson, G.P. y Komarov, E.; "Health effects in residents of high background radiation regions"; en OIEA Proceedings of a Symposium; Viena, 1983
35. INSTN-IAEA; "Exposition internes liees aux incorporations radioactives. Devenir Biologique des radioelements"; France, 1987
36. International Commission on Radiological Protection; "Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation"; Reporte No. 39; Pergamon Press; N.Y., 1987
37. Karlsruher Nuklidkarte; "Tabla de radionucleidos"; 1981
38. Kathren, Ronald L.; " Radioactivity in the environment sources, distribution and surveillance"; Harwood Academic Publishers; N.Y., 1984

39. Kelly G.N., Jones J.A., Bryant P.M. and Morely F.; *"The predicted radiation exposure of the population of the european community resulting from discharges of krypton-85, tritium, carbon-14 and iodine-129"*; CEC; Luxembourg, 1975
40. Knoll; *"Radiation detection & Measurement Wiley"*
41. Lapp-Andrews; *"Nuclear radiation physics"*; Prentice Hall
42. Ley general de salud; artículo 94, Norma técnica 316; México, 1988
43. Mattler, Fred A. y Sinclair, Warren K.; *"The 1986 and 1988 UNSCEAR Reports: Findings and implications"*; Health Physics 58/3; 1990
44. Merrill Eisenbud; *"Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources"*; Academic Press; 1987
45. Moiseev, A.A. y Nénot, J.C.; *"Vigilancia interna de la incorporación de materiales radioactivos"*; Nuevos enfoques de la CIPR; OIEA; Boletín 3; 1988
46. Mujin, K.; *"Física Nuclear Recreativa"*; Editorial Moscú; URSS, 1985
47. Morgan, K.Z.; *"Principles of radiation protection"*; John Wiley & Sons; Inc 1973
48. National Council on Radiation Protection; *"Radionuclides in the Earth"*; NCPR Reporte No.45; Washington, 1987
49. Navarrete M. y L. Cabrera; *"Introducción al estudio de los radioisótopos"*; Col. Ed. Sector Eléctrico, Num. 10, CFE; México D.F., 1979
50. O'Brien, K. y Laughlin, J.; *"The radiation dose to man from galactic cosmic rays"*; Health Physics; Vol 22; 1984

51. OIEA; "Basic principles of monitoring for occupational radiation monitoring"; Colección Seguridad No.84; Viena, 1987
52. OIEA; "La energía nucleoelectrica, el medio ambiente y el hombre"; Viena, 1984
53. OIEA; "Measurement of radionuclides in food and the environment technical report"; Series No. 295; Vienna, 1989
54. OIEA; "Normas fundamentales de radioprotección"; Colección Seguridad No. 9; 1982
55. OIEA; "Radioprotection"; Vol. 30, No.3; Viena Austria, 1988
56. OIEA; "Recovery operation in the event of a nuclear accident or radiological emergency"; 1990
57. Organización Mundial de la Salud; Niveles de Intervención Derivados Para los Radionucleidos en los Alimentos; Ginebra Suiza, 1989
58. OMS; "Derived intervention levels for radionuclides in food; guidelines for application after widespread radioactive contamination resulting from a major radiation accident"; Ginebra, 1988
59. OMS; "Niveles de intervención derivados para radionuclidos en alimentos"; 1989
60. OMS/FAO; "Proposals for action by the commission in relation to radionuclide contamination of foods"; Food standards programme; Codex committee on food additives and contaminants; 21th session, 13-17 March 1989

61. OMS/FAO; "Niveles de orientación para radionucleidos en alimentos aplicables en el comercio internacional tras una contaminación nuclear accidental"; Comisión del Codex Alimentarius. Suplemento 1 al vol. XVII del Codex Alimentarius Contaminantes; Primera edición; Roma, 1990
62. Price William J.; "Nuclear radiation detection"; second edition; McGraw-Hill Book Company; N.Y., 1964
63. Sharpe J.; "Nuclear radiation detectors"; Ohio, 1985
64. Scott Russel R. (Ed.); "Radioactivity and human diet"; Oxford, Pergamon Press, 1966
65. Seese William S., Daub G. William; "Química"; Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.; Quinta edición; México, 1989
66. Simonds J.R., Linsley G.S. and Jones J.A.; "A general model for the transfer of radioactive materials in the terrestrial food-chains"; Harwell, NRPB R-89; Londres, HMSO 1979
67. Smith B. Roger; "A base principle"; General Motors Cancer Research Foundation; Accomplishments in Cancer Research 1988
68. Spinks, J.W.T. y Woos, R.J.; "An introduction to radiation chemistry"; John Wiley & Sons; N.Y., 1984
69. Squires G.L.; "Practical Physics"; 1988
70. Turner, James E.; "Atoms, Radiation and Radiation Protection"; Pergamon Press; N.Y., 1986
71. United Nation Environment; "Radiation Doses, Effects, Risks"; Programme 1985

72. United Nations Scientific Comitee on the effects of Atomic Radiation; "*Sources and effects of ionizing radiation*"; N.Y., 1977
73. United Nations Scientific Comitee on the effects of Atomic Radiation; "*Ionizing Radiation: sources and biological effects*"; *Exposiciones a la radiación de fuentes naturales*; N.Y., 1982
74. United Nations Scientific Comitee on the effects of Atomic Radiation; "*Sources and effects of ionizing radiation*"; *Exposures from natural sources of radiation*; N.Y., 1988
75. Vertes, A. y Kiss, I.; "*Nuclear Chemistry*"; Elsevier Publishing; Amsterdam, 1987