



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS,

S. C.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

***“Estudio de la radiactividad natural en la ciudad
Aldama, Chihuahua”***

T E S I S

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

Ing. Marusia Rentería Villalobos

ASESORES:

Dra. María Elena Montero Cabrera,

Dr. Eduardo F. Herrera Peraza

Agosto 2003

Chihuahua, Chih

Contenido	Página
Objetivos	1
Marco teórico	2
Elementos de estructura nuclear	2
Origen y características de la radiación ionizante	5
Medida de la radiactividad	8
Desintegraciones sucesivas y equilibrio radiactivo	10
Interacción de la radiación ionizante en la materia	13
Radiactividad en el medio ambiente	21
Dosis de radiación ionizante	23
Efectos biológicos de la radiación ionizante	26
Vigilancia radiológica ambiental	29
Metodología	40
Espectrometría gama	40
Determinación de la radiactividad en suelo	45
Determinación de radón en interior de domicilios	50
Determinación de radón en agua por el método de centelleo líquido	55
Determinación de la concentración de ^{238}U por el método de fluorescencia de rayos X	61
Resultados	68
Resultados de radiactividad en suelo	68
Resultados de radón en interior de domicilios	69
Resultados de radón en agua.	72
Resultados de la determinación de concentración de uranio mediante rayos X por espectrometría gamma.	74
Discusión de resultados	76
Conclusiones	79
Recomendaciones	80
Tablas	81
Bibliografía	85
Anexos	88

Agradecimientos

A mis profesores la Dra. María Elena Montero Cabrera y el Dr. Eduardo Herrera Peraza por compartir sus conocimientos conmigo, por su gran amistad y cariño.

Al CONACyT y CIMAV por permitirme desarrollar mi trabajo de tesis.

Dedicatoria

A mi padres, hermanos y a ti Fernando, les dedico este esfuerzo resumido a trabajo. Gracias a todos ustedes por ser el motor de mi vida.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL.

Determinar los niveles de radiactividad en suelo, concentraciones de ^{222}Rn en agua potable y subterránea, así como en aire de interiores. Determinar la concentración de Uranio en material superficial proveniente de Peña Blanca, esto en la ciudad de Aldama, Chihuahua.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- ◆ Establecer un programa de muestreo (tamizaje), para muestras de suelo.
- ◆ Establecer un programa de muestreo (aleatorio), para la concentración de radón en interiores.
- ◆ Establecer un programa de muestreo (aleatorio), para agua de consumo.
- ◆ Establecer el nivel medio de radón en interior de domicilios, así como en agua subterránea y domiciliaria de la ciudad de Aldama.
- ◆ Aplicar los métodos analíticos de espectrometría gamma (radiactividad en suelo, Rn en interiores), centelleo líquido (agua domiciliaria y pozos) y fluorescencia de rayos X (concentración de Uranio).

I. ELEMENTOS DE ESTRUCTURA NUCLEAR.

La menor fracción que obtenemos, si subdividimos un cuerpo, y que conserva las mismas características químicas de éste son los átomos. Las dimensiones típicas de un átomo son de 10^{-10} m. Los átomos están formados por un núcleo y los electrones que se hallan a su alrededor.

Los átomos se clasifican de acuerdo al número de electrones que rodean al núcleo en el átomo neutro, ya que de ellos dependen las propiedades químicas. A ese número se le llama número atómico y separa a los átomos en los diferentes elementos químicos.

Los núcleos están compuestos por protones y neutrones, y forman el centro de fuerzas y de masas del átomo. Los átomos tienen diferente tamaño y propiedades químicas dependiendo el número de protones que hay en su núcleo, pues es igual que el número de electrones, cuando es neutro.

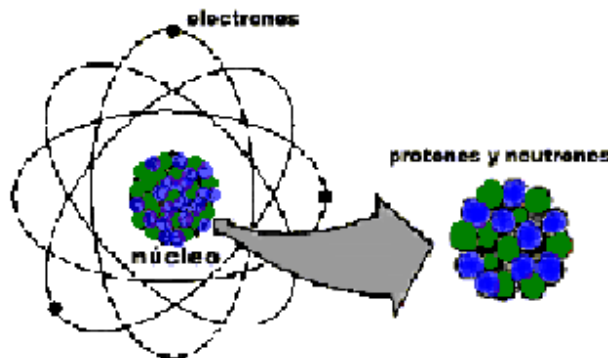


Figura A. Estructura Atómica

Los protones son partículas positivas que tienen una carga de 1.602×10^{-19} Coulomb y una masa de 1.007276 u, donde una unidad de masa atómica [u] = 1.6606×10^{-27} kg. Cuando hay varios protones en un núcleo estos se repelen entre sí, por ser de igual carga. Al principio se creyó difícil que partículas de carga igual, positiva, pudieran estar tan cerca y en un espacio tan pequeño.

En 1932 James Chadwick descubrió al neutrón (carga = 0, $m_n = 1.008665$ u, 0.1 % mayor que el protón) y lo ubicó en el núcleo.

Propuso que por ser una partícula neutra haría barrera entre los protones, contribuyendo a estabilizar la repulsión electrostática.

En estado libre (fuera del núcleo) los neutrones tienen una vida corta (tiempo de vida promedio 11.8 min). Sin embargo, en el núcleo y con protones alrededor los neutrones son estables, y se someten a una de las cuatro fuerzas del universo, la interacción nuclear fuerte, que mantiene unidos a los protones y neutrones, pero es de corto alcance (10^{-15} m).

Los elementos químicos en la naturaleza están formados por una mezcla de diferentes isótopos prácticamente estables. Se llama isótopos a los diferentes átomos del mismo número atómico, pero diferente masa atómica, es decir, se diferencian entre sí por el número de neutrones dentro del núcleo, pero con la misma carga. Debido a las diferentes relaciones entre neutrones y protones en el núcleo, este puede ser inestable.

ENERGÍA DE ENLACE.

La estabilidad del núcleo se representa por la energía que es liberada cuando los protones y neutrones libres se unen para formar un núcleo enlazado. En Física Atómica y Nuclear, la unidad más usada para expresar la magnitud energía es el electrón-volt (eV), que equivale a la energía que adquiere un electrón al atravesar una diferencia de potencial eléctrico de 1V, y vale $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ J. Para las energías atómicas y nucleares se hacen los múltiplos de kilo-electrón-volt ($1\text{keV} = 10^3$ eV) y mega-electrón-volt ($1\text{MeV} = 10^6$ eV).

La energía de enlace (ΔW) se calcula a través

$$\Delta W = [ZM_P + NM_N - M_N(A, Z)]C^2 \quad (1)$$

Donde:

Z = número de protones.

N = número de neutrones.

M_p = masa del protón.

M_N = masa del neutrón.

M_N = masa del núcleo.

C = velocidad de la luz 3×10^{10} cm/seg.

y la energía de enlace específica o por nucleón es:

$$\varepsilon = \frac{\Delta W(A, Z)}{A} \quad (2)$$

Donde: A es el número de nucleones.

Esta energía de enlace por nucleón, se refiere a la energía promedio que hay que entregar por nucleón para separar el núcleo en sus componentes. Este es un valor bastante grande, del orden de los MeV (Mega electrón-volt), que si se compara con la energía para sacar un electrón del átomo, que es del orden de electrón-volt (eV), la diferencia es de 10^6 veces, lo que comprueba la gran estabilidad del núcleo de un átomo, con respecto al potencial de ionización de los electrones del átomo [1].

II. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN IONIZANTE.

Se llama radiación ionizante a los rayos que, debido a su alta energía cinética, a su paso por los materiales provocan ionización o excitación de las moléculas o de los cristales, o producen separación de cargas eléctricas dentro del material.

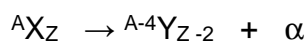
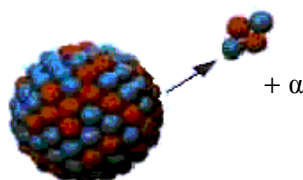
La primera radiación ionizante que se conoció fueron los rayos X, descubiertos en 1895 por Wilhelm Conrad Roentgen. Se producen cuando en un tubo al vacío (llamado tubo de rayos catódicos) se polarizan sus dos electrodos con una diferencia de potencial muy alta (kilovoltios), del orden de la energía del potencial de ionización de los electrones más internos del material del ánodo (kiloelectrón-voltios). Otro tipo de radiación ionizante es la radiactividad.

RADIOACTIVIDAD Y TIPOS DE DESINTEGRACIÓN RADIOACTIVA.

Los términos radiactividad y desintegración radiactiva se utilizan indistintamente para calificar el fenómeno de la descomposición espontánea de los núcleos atómicos, acompañado de la emisión de radiación ionizante. Los tipos más comunes de radiactividad se denominan por las letras griegas α , β y γ . A las diferentes especies nucleares radiactivas se les llama núclidos o isótopos radiactivos, ya que en todos los elementos químicos existe al menos un isótopo radiactivo. Desde el punto de vista químico los isótopos radiactivos no se diferencian de los estables.

RADIOACTIVIDAD ALFA.

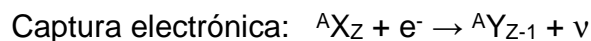
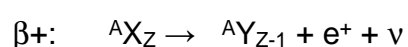
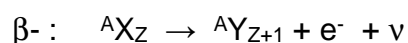
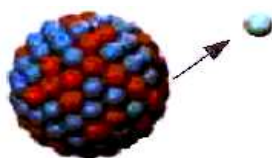
La radiactividad α consiste en la emisión de núcleos de ${}^4\text{He}$, resultando un núcleo con 2 neutrones y 2 protones menos:



Son isótopos α activos naturales el ^{147}Sm y los miembros de las familias del ^{232}Th , ^{235}U y ^{238}U , y los artificiales son los lantánidos y los actínidos, por ejemplo, la familia del ^{239}Np .

RADIATIVIDAD BETA.

La radiactividad β consiste en la emisión de un electrón negativo o positivo y un neutrino, o en la absorción de un electrón con la emisión de un neutrino y los rayos X característicos del elemento del núcleo resultante:

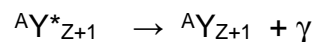
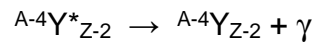
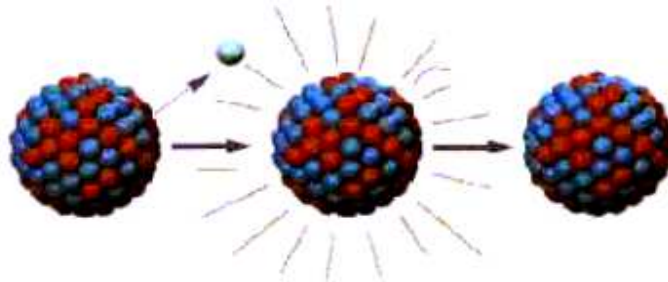


Todos los elementos químicos tienen al menos un isótopo β^- activo.

Si ocurre captura electrónica queda un estado electrónico vacante. Cuando hay una vacancia en la capa K, los electrones de capas superiores sufren transiciones para ocupar las vacancias, y se emiten los rayos X característicos del elemento del núcleo hijo ($Z-1$). También a veces se transmite la energía de excitación de los elementos a un electrón externo, llamados electrones de Auger. La emisión de los rayos X característicos y de electrones de Auger compiten entre sí.

RADIATIVIDAD GAMMA.

La radiactividad γ consiste en la desexcitación de un núcleo producto de una desintegración α o β previas mediante la emisión de radiación electromagnética de alta energía, llamada rayos γ .



La radiación γ se atribuye convencionalmente al isótopo α o β radiactivo que la produce.

A veces la energía de excitación se transmite directamente a un electrón del átomo, sin pasar por un fotón intermedio. Esa transmisión se llama conversión interna, y a los electrones emitidos, electrones de conversión interna. Se producen entonces electrones monoenergéticos.

Para que un núcleo se desintegre espontáneamente es necesario que la masa del sistema resultante sea menor que la del núcleo que se desintegra, pues en caso contrario no se emite energía, y esta condición no es suficiente. La teoría de la Física Nuclear se dedica en parte a justificar o predecir por qué los núcleos que cumplen esa condición no se desintegran inmediatamente después de formarse.

La radiactividad tiene algunas regularidades en la tabla periódica de los elementos, ya que todos los átomos con Z mayor de 82 son radiactivos, excepto el Bi-209. Hay solo tres isótopos del Pb estables: los de masa 206, 207 y 208.

III. MEDIDA DE LA RADIATIVIDAD.

Una muestra que contenga núcleos radiactivos emite la radiactividad con cierta intensidad, que varía en el tiempo. La magnitud de dicha intensidad se conoce como Actividad.

La actividad A de una muestra que contiene un solo isótopo radiactivo viene dada por su ritmo de desintegración; si N es el número de núcleos radiactivos sin desintegrar presentes en la muestra:

$$A = - dN/dt \quad (3)$$

Al pasar el tiempo la actividad de una muestra con un solo isótopo disminuye, según su periodo de semidesintegración o semivida. El periodo de semidesintegración $T_{1/2}$, es el tiempo que transcurre para que la actividad de una muestra se reduzca a la mitad:

$$A(T_{1/2}) = \frac{A(0)}{2} \quad (4)$$

Esta expresión se generaliza según la llamada Ley Experimental de la Desintegración Radiactiva:

$$A(t) = A(0)2^{-t/T_{1/2}} = A(0)e^{-\lambda t} \quad (5)$$

El parámetro λ se llama constante de desintegración y cumple con:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (6)$$

Debido a la forma exponencial de la Ley de la Desintegración Radiactiva, la ecuación diferencial es:

$$dN/dt = - \lambda N \quad (7)$$

Se puede interpretar a la constante λ como la probabilidad de desintegración de un núcleo radiactivo por unidad de tiempo, y se define la llamada **actividad instantánea**:

$$A = \lambda N \quad (8)$$

Los parámetros de semivida o periodo de semidesintegración y constante de desintegración caracterizan a los isótopos radiactivos, y en un experimento de radiactividad es importante tenerlos en cuenta, ya que pueden explicar o no la aparición de valores de energía en un espectro, y contribuyen a identificar los isótopos de una muestra. Si se mide la actividad instantánea en el tiempo se puede obtener una gráfica semilogarítmica con una recta cuya pendiente nos da la constante de desintegración.

Se llama actividad específica a la actividad de una muestra por unidad de masa o volumen:

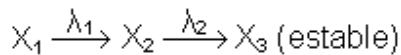
$$\text{Sólidos: } A_{\text{esp}} = A / \text{masa} \quad (\text{Bq/kg o Ci/g}) \quad (9)$$

$$\text{Líquido o gas: } A_{\text{esp}} = A / \text{volumen} \quad (\text{Bq/m}^3 \text{ o Ci/litro}) \quad (10)$$

Las unidades especiales de actividad son el Curie y el Bequerel. Históricamente, por definición, un gramo de Radio tiene un curie de actividad y es igual a 37 billones de desintegraciones por segundo, un pico Curie es igual a 10^{-12} Curie, el cual es aproximadamente dos desintegraciones por minuto, mientras que el Bequerel, la cual es una unidad especial de actividad en el sistema internacional de unidades (SI), es equivalente a una desintegración por segundo [2].

IV. DESINTEGRACIONES SUCESIVAS Y EQUILIBRIO RADIOACTIVO.

Frecuentemente un núcleo radiactivo da lugar a otro núcleo radiactivo, generando desintegraciones sucesivas o cadenas de desintegración. En una muestra que inicialmente contenga solo de la primera especie sin desintegrar, con el tiempo aparecerán cantidades variables de los núcleos de las especies radiactivas que se producen en la cadena. Suponiendo la cadena de desintegración:



y que el número de núcleos sin desintegrar de cada especie se designa por los mismos subíndices, para describir el contenido de isótopos de la muestra, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$dN_1/dt = -\lambda_1 N_1 \quad (11)$$

$$dN_2/dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (12)$$

$$dN_3/dt = \lambda_2 N_2 \quad (13)$$

la solución del sistema de ecuaciones es:

$$N_1(t) = N_1(0) e^{-\lambda_1 t} \quad (14)$$

$$N_2(t) = \{\lambda_1 N_1(0) / (\lambda_2 - \lambda_1)\} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (15)$$

Si multiplicamos las expresiones por sus respectivas constantes de desintegración, resultan las actividades instantáneas de los isótopos 1 y 2.

Si $\lambda_1 < \lambda_2$, se llama *equilibrio transitorio*. Este comportamiento conduce a que después de cierto tiempo el ritmo de desintegración del segundo isótopo esta gobernado por el ritmo de desintegración del primero.

Si $\lambda_1 \ll \lambda_2$, conduce al llamado *equilibrio secular*. Una vez establecido conduce a que las actividades de los dos isótopos sean iguales.

Otro fenómeno frecuente es que una especie nuclear tenga más de una variante o canal de desintegración, con una probabilidad determinada para cada caso. Cada bifurcación tiene su propia constante de desintegración, y el sistema de ecuaciones puede ser más complejo. La probabilidad de desintegración está dada por la suma de todas las constantes. Este es un fenómeno que es común en la radiactividad gamma, que conduce en ciertas ocasiones a los llamados isómeros nucleares [3]. Los isómeros son los estados de un mismo isótopo radiactivo que tienen diferentes periodos de semidesintegración, debido a que el isótopo padre se desintegró por canales diferentes de constantes de desintegración distintas.

En la figura B se muestra la bifurcación en dos canales de la desintegración del ^{212}Bi

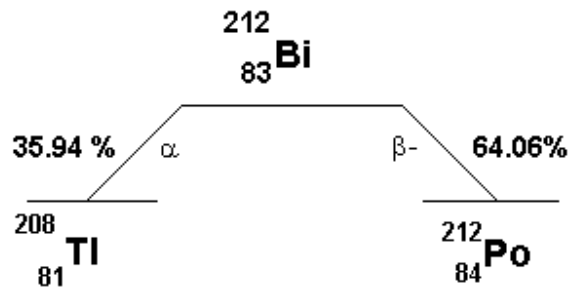
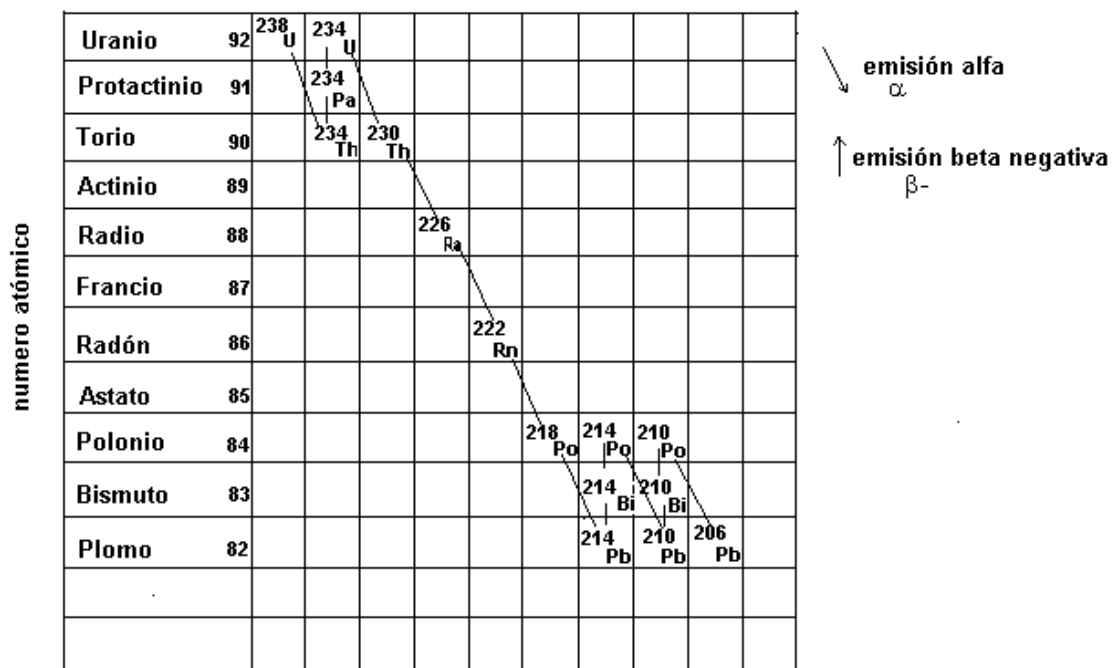


Figura B. Esquema de desintegración

El fenómeno de las desintegraciones sucesivas conduce a la existencia de las familias o series radiactivas, que existen en la naturaleza como resultado de las desintegraciones sucesivas de los isótopos Th y U de semivida mayor o del mismo orden que la historia de nuestro planeta [4].

Una serie de estas familias radiactivas se presentan en la siguiente figura.



SERIE RADIATIVA $4n + 2$ (U-238)

Figura C. Ejemplo de una serie de desintegración radiactiva (U-238).

V. INTERACCIÓN DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN LOS MATERIALES.

Partículas cargadas pesadas.

Las partículas cargadas pesadas, como son las partículas α , al penetrar en un material después de ser emitidas por un núcleo radiactivo, sufren el llamado frenado ionizante, que consiste en la interacción electrostática entre la partícula y los electrones del medio donde penetró, produciendo así la pérdida de energía de la partícula α lo largo de su trayectoria, hasta que se detiene completamente y se incorpora al medio en forma de átomo. La entrega de energía de la partícula a los electrones del medio produce excitación o ionización de los átomos del medio y se llama ionización primaria, por ser producida por la partícula misma. Las partículas pesadas tienen mayor masa en comparación con la de los electrones con los que interactúa, por lo que la trayectoria de las mismas en el medio es prácticamente rectilínea [1].

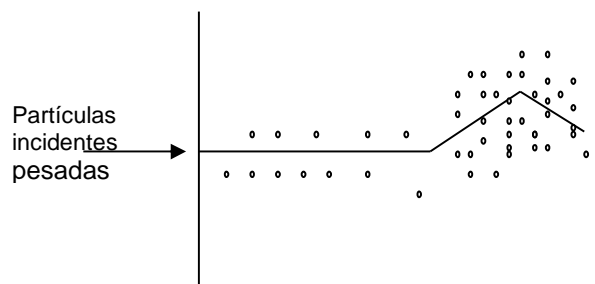


Figura D. Ionización por partículas pesadas.

El comportamiento o magnitud de este frenado depende de los parámetros de la partícula como masa de reposo, velocidad o energía cinética, carga eléctrica, así como de las características del medio en el que viaja.

ALCANCE.

El alcance es el espesor mínimo de material que absorbe completamente todas las partículas del haz que incide sobre él. En el caso de las partículas α , éstas tienen trayectorias definidas y choques antes de detenerse, por lo que se dice

tienen alcance definido. Por ejemplo, una partícula α de unas 5.5 MeV recorre 4 cm en el aire antes de detenerse e incorporarse al medio. Existen fórmulas empíricas para calcular el alcance de las partículas α en el aire a 0°C y 1 atm de presión:

$$R_{\text{aire}}(\text{en cm}) = 0.56 E(\text{en MeV}) \quad \text{para } E < 4 \text{ MeV} \quad (16)$$

$$R_{\text{aire}}(\text{en cm}) = (1.24E) - 2.62 \quad \text{para } 4 \text{ MeV} < E < 8 \text{ MeV} \quad (17)$$

El alcance de las partículas α de un medio distinto del aire se calcula a través de la expresión:

$$R_m = 0.56 M^{1/3} R_{\text{aire}} \quad (18)$$

Donde:

R_m = alcance dado en densidad superficial (mg/cm^2)

M = masa atómica promedio del material que atraviesa la partícula.

Para convertir la densidad superficial en unidades lineales se utiliza la relación:

$$X = d/\rho \quad (19)$$

d = densidad superficial

ρ = densidad másica del material en g/cm^3 o Kg/m^3

Partículas cargadas ligeras.

Las partículas cargadas ligeras, como son las partículas β y los electrones producidos en un acelerador, también sufren el efecto de frenado ionizante al penetrar en un material. Las masas iguales del blanco y la partícula β (electrones),

producen desviaciones de la dirección inicial, tanto en choques con los núcleos como con los electrones, dando lugar a que ocurra retrodispersión, trayectorias poco definidas, que sufren muchos choques antes de detenerse, por lo que estas partículas tienen un alcance poco definido.

Por lo tanto, los electrones son más penetrantes y menos ionizantes que las partículas pesadas.

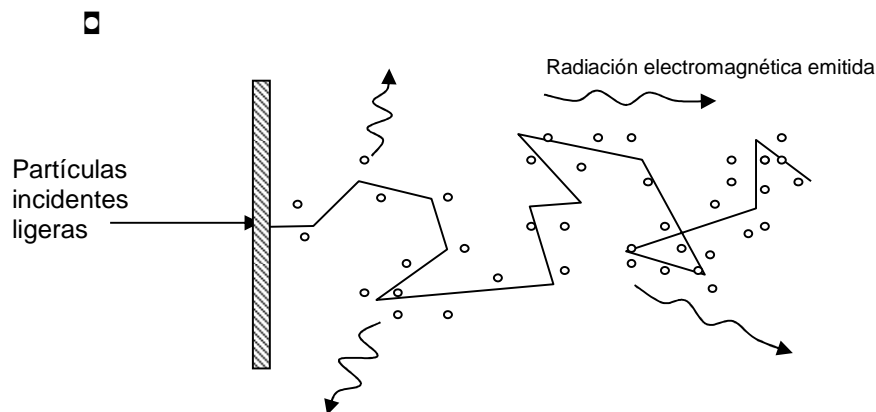


Figura E. Ionización y trayectoria de las partículas cargadas ligeras.

El fenómeno de retrodispersión consiste en que los electrones incidentes se reflejan en la superficie del material. Este fenómeno crece con el espesor del absorbente, pero a cierto espesor se satura.

INTERACCIÓN DE LOS RAYOS X Y γ .

Los rayos X y γ son iguales físicamente, únicamente se distinguen por la fuente que los emite y constituyen radiación electromagnética de alta energía. Debido a esto exhiben un marcado carácter corpuscular y su interacción es individual en los materiales. Como consecuencia, el cuanto luminoso desaparece del haz cuando interactúa y transfiere parte o toda su energía a un electrón. Todas estas características hacen que la interacción de los rayos γ sea diferente a la de las partículas cargadas. Los rayos X y γ producen ionización secundaria, es decir, ellos mismos no ionizan sino el electrón por ellos liberado o producido.

Atenuación de los rayos gamma.

Si se hace incidir un haz de rayos γ sobre un material y se mide la intensidad del haz después de atravesarlo, notaremos que su intensidad ha disminuido, pero nunca se hace cero. A este fenómeno se le llama atenuación de los rayos γ .

Este fenómeno es diferente a los efectos que se observan al hacer incidir un haz de partículas α y β , en las que si el espesor del material atravesado es suficientemente grande, el haz de partículas desaparece.

La diferencia es que las partículas cargadas van entregando su energía a lo largo de su trayectoria y al quedar sin energía, no desaparecen sino que se incorporan al material. Los rayos γ son fotones, es decir, partículas neutras y sin masa de reposo. Su interacción ocurre o no de acuerdo a las probabilidades, es decir, un fotón puede viajar dentro del material sin sufrir ningún cambio hasta que ocurre la interacción y una vez que interactúa, el rayo γ desaparece del haz. Por este motivo haz de rayos γ se atenúa, y la energía de los rayos emergentes del material es igual a la de los incidentes, aunque la intensidad del haz sea menor.

Si se hace pasar un haz de rayos paralelos y monoenergéticos de intensidad inicial I_0 a través de un material de espesor x el haz transmitido tiene una intensidad I , que se describe por:

$$dI = -\mu I dx \quad (20)$$

y la solución:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (21)$$

μ = coeficiente de atenuación.

El coeficiente de atenuación lineal es proporcional a la probabilidad de interacción de los rayos γ , por uno u otro mecanismo, y a la densidad de los objetos que hacen el papel de blanco en esas interacciones.

Si ρ es la densidad másica del elemento, el coeficiente de atenuación másico es:

$$\mu_m = \mu/\rho \quad (22)$$

y permite calcular su valor para compuestos o mezclas conociendo la fracción atómica Ω_i :

$$\mu_{m|c} = \sum \Omega_i (\mu_m)_i \quad (23)$$

Origen y clasificación de los rayos X.

Los rayos X característicos son originados por la transición de electrones en las capas internas de los átomos. La energía de dichos rayos X es igual a la diferencia energética de las capas de los electrones involucrados en la transición, estas intensidades corresponden a la transición probable.

Las líneas son designadas por los símbolos K, L, M, etc. Esta notación indica que las líneas son originadas por el traslado inicial de un electrón a las capas K, L, M respectivamente. Una línea particular en las series es designada por las letras α, β, γ , etc., representando la capa del electrón involucrado en la transición. Finalmente un subíndice numérico indica la intensidad de cada línea de una serie particular ($K_{\alpha 1}$ es mas intensa que $K_{\alpha 2}$) [5]. En la siguiente figura se presentan las transiciones electrónicas:

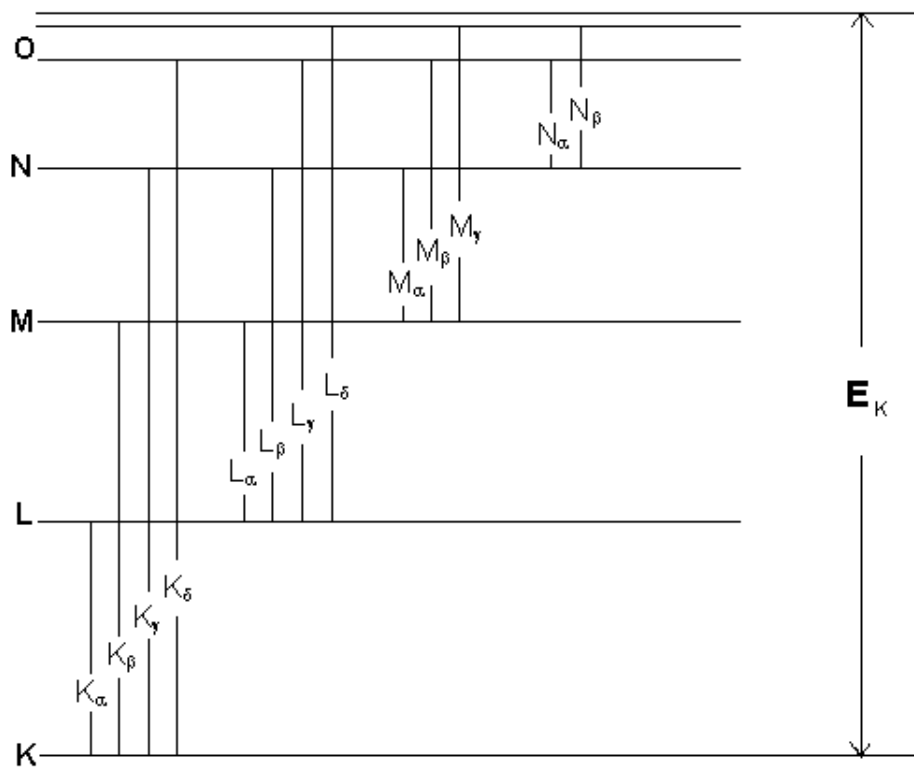


Figura F. Transiciones electrónicas que originan espectros característicos de los rayos X

Mecanismos de interacción de los rayos γ .

Efecto fotoeléctrico.- Consiste en la absorción completa del cuanto luminoso de energía $E_{\gamma} = h\nu$ por un sistema enlazado de electrones con la liberación de un electrón:

$$E_e = h\nu - E_i$$

E_i es la energía de enlace del electrón al átomo. Este efecto ocurre únicamente con electrones enlazados, lo que quiere decir que la energía del cuanto luminoso tiene que ser mayor, pero del mismo orden, que la energía de enlace del electrón. Cuando el efecto fotoeléctrico ocurre con un cuanto γ que tiene energía del orden de los kiloelectrónvolts o mayores, los electrones enlazados son los de las capas atómicas más internas de los átomos. El fotoefecto produce vacancias en las capas internas de los átomos, por lo que se producen rayos X y electrones de

Auger. El fotoefecto no ocurre con electrones de los elementos más ligeros y mayor es la probabilidad de que ocurra éste efecto, mientras más pesado es el elemento. El fotoelectrón liberado, tiene entonces suficiente energía para producir ionización en el medio en el que se mueve, hasta que pierde toda su energía y se incorpora como un electrón más.

Efecto Compton.- Consiste en dispersión elástica del cuanto luminoso con un electrón libre. Un cuanto γ encuentra a electrones libres cuando su energía es mucho mayor que la energía de enlace de los electrones al sistema, $h\nu \gg E_i$. El fotón dispersado tiene una energía $h\nu'$ menor que la del fotón incidente, de acuerdo al ángulo de dispersión del cuanto γ . El electrón de Compton lleva el resto de la energía, $E_e = h\nu - h\nu'$. La energía de este electrón también es suficientemente alta como para producir ionización secundaria, por lo cual estos electrones pierden toda su energía y se incorporan al medio. El cuanto γ dispersado puede sufrir nuevamente alguna interacción en el medio o escapar del mismo.

Formación de Pares $e^- - e^+$.- Consiste en la interacción de un cuanto γ con el campo eléctrico de un núcleo (o un electrón) del medio donde se traslada, de modo que el cuanto γ desaparece y en su lugar aparecen un electrón y un positrón. La energía mínima o de umbral para que ocurra el efecto es $h\nu = 2mc^2 = 1.022 \text{ MeV}$, si el efecto ocurre en el campo de un núcleo, y de $h\nu = 4mc^2$ si ocurre en el campo de un electrón ($m =$ masa de reposo del electrón). En el primer caso, la energía cinética de las partículas es igual a la que tenía el cuanto γ menos la masa de reposo de las dos partículas, $E_{e^+e^-} = h\nu - 2mc^2$ y se reparte entre ambas. Cuando el positrón está casi en reposo, se aniquila con un e^- y produce dos cuantos γ de energía $h\nu = mc^2$. Estos cuantos pueden interactuar nuevamente o escapar del medio. No hay una expresión matemática simple para la probabilidad de formación de pares pero varía aproximadamente con Z^2 del absorbente y crece con la energía después del umbral.

Como al interactuar un cuanto γ en el material la ocurrencia de un mecanismo u otro es excluyente y las probabilidades son independientes, la probabilidad de interacción es la suma la suma de las probabilidades parciales, por lo tanto, el coeficiente de atenuación total esta dado por:

$$\mu \text{ (total)} = \mu \text{ (fotoefecto)} + \mu \text{ (Compton)} + \mu \text{ (e+e-)}$$

Modelo general de un detector.

Los detectores se basan en la interacción de la radiación en los materiales. Estos equipos deben modificar los efectos de la interacción para que sean perceptibles o medibles. Estos dispositivos nos ayudan a detectar la presencia de isótopos radiactivos, y medir su concentración y/o su intensidad. La radiación proveniente de la muestra, interactúa en el cristal del detector manifestando una señal ya sea eléctrica, luminosa, química, etc., produciendo ionización en forma de electrones y huecos para luego ser colectados en electrodos en forma de pulsos de pequeña amplitud para luego ser amplificados en un preamplificador y amplificador, saliendo pulsos de amplitud proporcional a la carga colectada en el detector y por lo tanto a la energía de los electrones producidos por los efectos de interacción, ver figura G.

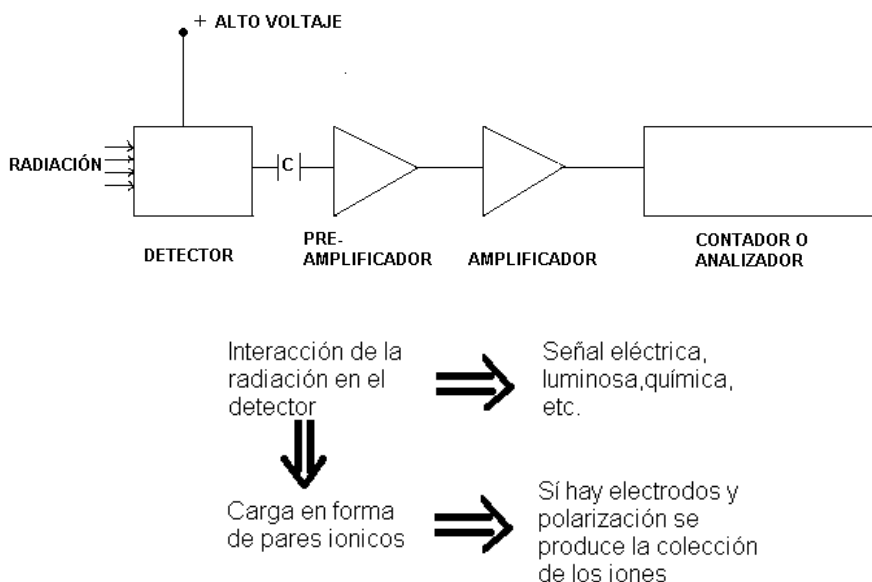


Figura G. Modelo simplificado de un detector de radiación ionizante.

VI. RADIATIVIDAD EN EL MEDIO AMBIENTE.

La radiación nuclear esta presente en la vida desde su propio surgimiento, a través de los rayos cósmicos y la radiactividad natural terrestre, seguido por factores humanos.

Los rayos cósmicos producen exposición externa, así como las fuentes terrestres producen exposición externa e interna, por ejemplo las rocas, los alimentos, incluso cuerpos vivos tienen una cantidad fija de los isótopos ^{14}C y ^{40}K . Las rocas, el suelo, los materiales de construcción y diversos materiales, tienen en alguna medida los elementos radiactivos uranio y torio, los que en sus cadenas de desintegración se generan isótopos que producen ambos tipos de exposición [4], ver Tabla 1.

El hombre recibe radiación debido a dos factores: *Naturales* y *Artificiales*.

Radiactividad por *factores naturales*:

- Espacio exterior: la tierra recibe una gran cantidad de radiación principalmente por rayos cósmicos (80% protones y 20% partículas alfa).
- De los radioisótopos de las series de desintegración radiactiva ^{232}Th y ^{238}U que se encuentran en suelo, rocas y yacimientos.
- El uso de materiales para construcción.
- Viajes aéreos transoceánicos.

El ^{14}C , ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U e hijos, son los isótopos que mayormente causan esta radiación de origen terrestre.

La radiactividad por *factores artificiales*:

- las explosiones de bombas nucleares en la atmósfera.
- Accidentes nucleares como: Chernobil, Three Miles Island, Kyshtym, Windscale.

- Producción de energía eléctrica.
- Producción y uso de radioisótopos.
- Fabricación de armas nucleares.
- Aplicaciones médicas de los radioisótopos.
- Y otros.

Entre los isótopos que causan esta radiación, se encuentran: ^{14}C , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{131}I , ^{133}Xe , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{192}Ir , ^{210}Po , ^{222}Rn , ^{238}Pu , ^{239}Pu .

Usos de la radiación.

La radiación se utiliza en la medicina y en la industria. Las primeras aplicaciones históricas fueron las radiografías, y después la irradiación de tumores cancerosos. Luego de estas aplicaciones se comenzó a usar en la industria para diagnóstico (radiografías industriales, sondeo nuclear de las rocas en pozos petrolíferos y en yacimientos de minerales en general, el estudio del transporte en la industria y el medio ambiente, etc.).

Hoy en día, el diagnóstico médico con radiación es una herramienta muy poderosa para tomografías de órganos como el corazón y el cerebro, con radioisótopos. Se usa también, por su acción en los materiales, en mejorar cultivos, la medicina (terapia), la biotecnología y la industria (Ver Tabla 2).

VII. DOSIS DE LA RADIACIÓN IONIZANTE.

La ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica) es una organización internacional que ha dado recomendaciones desde los primeros años del siglo XX, con objeto de minimizar las exposiciones del personal, tanto del profesional como a la población, que por algún motivo tienen que exponerse algún campo de radiación.

Magnitudes y unidades.

Exposición: la exposición X es el cociente absoluto de la carga total de los iones de un signo producidos en aire cuando todos los electrones liberados por fotones en una masa de aire dada se frenan completamente en el aire.

$$X = dQ/dm \quad \text{unidad: coulomb/kg} = \text{Ckg}^{-1} \quad (24)$$

Otra unidad es el Roentgen (R)

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ Ckg}^{-1}$$

Rapidez de exposición: la rapidez de exposición \dot{X} expresa el incremento de la exposición en la unidad de tiempo. Otros autores utilizan la expresión "tasa", tanto para la exposición como para otras magnitudes de protección radiológica que definen su régimen respecto del cambio con el tiempo.

$$\dot{X} = dX / dt \quad \text{unidad: Ckg}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (25)$$

Se acostumbra Rh^{-1} , R min^{-1}

Dosis absorbida: la dosis absorbida D es el cociente de la energía promedio depositada por la radiación ionizante en una porción de materia en una masa dada.

$$D = dE/dm \quad \text{unidad: J kg}^{-1} \quad (26)$$

el nombre de esta unidad en la protección radiológica es *Gray* (Gr).

$$1\text{Gr} = 1 \text{ J kg}^{-1}$$

la unidad histórica de esta magnitud es el *rad*.

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg g}^{-1} = 10^{-2} \text{ Gr}$$

Rapidez de dosis absorbida: la rapidez de dosis \dot{D} expresa el incremento de la dosis absorbida en la unidad de tiempo.

$$\dot{D} = dD/dt \quad \text{unidad: J kg}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ o bien Gr s}^{-1} \quad (27)$$

Equivalente de dosis: en protección radiológica es necesario contar con una magnitud bien definida que exprese la relación entre dosis absorbida y el efecto biológico que produce. La dosis absorbida es insuficiente para predecir la severidad o la probabilidad del efecto bajo condiciones no especificadas, por esto se ha introducido otra cantidad que se relaciona mejor con los efectos más importantes, en particular con los probabilísticos tardíos, y a bajos niveles de dosis, como los que se encuentran normalmente en protección radiológica.

$$H = DQN \quad \text{unidad: J kg}^{-1} \quad (28)$$

Donde Q es el factor de calidad y N es el producto de todos los demás factores modificadores (incluye rapidez de dosis, fraccionamiento de la misma, etc.). por ahora la ICRP le ha asignado a N el valor de 1.

La unidad histórica de equivalente de dosis era el *rem* y ahora es el *Sievert* (Sv).

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1} = 100 \text{ rem.}$$

Factor de calidad Q: este factor pretende incluir el efecto de la deposición microscópica de energía en pequeñas formaciones de tejido vivo, como pueden ser las largas cadenas de proteínas de los genes en las células. Este factor se llama *transferencia lineal de energía*, y tiene en cuenta el poder de frenado de las partículas cargadas en los materiales (Ver Tabla 3).

Estos valores de Q y en consecuencia los de H, son únicamente para usarse en protección radiológica a niveles dentro o cerca de los límites de equivalente de dosis.

VIII. EFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES.

Los efectos de la radiación ionizante son consecuencia de la deposición de la energía de la radiación sobre las células, que provocan ionizaciones y excitaciones en los átomos de las moléculas que los componen, ruptura de enlaces moleculares y calor. La energía depositada da lugar a cambios químicos que se reflejan como *daño biológico* [1].

Efectos biológicos a nivel celular.

Cuando una célula se expone a la radiación existen cuatro posibilidades:

1. Que la célula no presente daño.
2. Que la célula sí experimenta daño, pero que pueda repararse y opere normalmente.
3. Que la célula sí experimente daño, no pueda recuperarse y siga viviendo, pero sus funciones queden alteradas.
4. Que la célula muera.

Teniendo en cuenta las partes principales de la célula:

- El citoplasma está compuesto por un 70% de agua y cuando la radiación incide sobre la célula es posible que interactúe con el agua, disociando las moléculas, produciendo radicales libres y otras moléculas.
- La membrana celular tiene la función de contener al citoplasma y al núcleo, así como permite el intercambio de sustancias con el exterior. Si la membrana se rompe con la radiación, dejará de proteger a la célula del exterior y esta morirá a menos que se repare.
- En el núcleo de la célula se encuentra contenida la información vital a través de los cromosomas. Si los cromosomas son alterados por la radiación, cuando se duplican a sí mismos para transferir la información a nuevas células, ésta puede estar alterada. Los daños que pueden producirse en el núcleo celular se deben a modificaciones en el ADN.

Estos efectos pueden producirse también en forma espontánea, o como resultado de la acción de otros agentes físicos o químicos. La célula cuenta con mecanismos de reparación que son eficaces cuando sólo se han producido daños en una de las cadenas de las moléculas de ADN, dado que la otra cadena actúa como molde para reconstruir la información. El tiempo de recuperación es de unas horas.

Factores que influyen en los efectos Biológicos.

Existen varias causas por las que puede presentarse un efecto más o menos severo. Para estudiar estas causas se clasifican en tres factores:

Factores Físicos.

Estos factores son la dosis absorbida, la rapidez de dosis, el tipo de radiación y el tamaño de área expuesta. Los factores físicos afectan la intensidad del efecto biológico debido a la exposición de la radiación ionizante dependen de las características de la radiación.

Factores Fisiológicos.

El factor fisiológico depende de las características del sujeto irradiado. Algunas células son más sensibles a los agentes nocivos que otras, tales como los virus, toxinas y a la radiación ionizante, a esto se le llama radiosensibilidad celular. Por lo tanto podemos citar algunos factores del ser humano tales como el sexo, edad, metabolismo, etc.

Factores Ambientales.

Dos de los factores ambientales son, la presión del oxígeno ambiental presente en las células y el estado del ciclo celular en que se encuentra la célula. La cantidad de oxígeno incrementa el número de células muertas, y que en las fases de síntesis y mitosis las células son más radiosensibles.

Clasificación de los efectos biológicos.

La energía depositada en las moléculas puede provocar la muerte celular. Si el número de células afectadas es grande, el tejido u órgano al cual pertenecen puede verse dañado. Este tipo de efectos reciben de efectos determinísticos, estos efectos tienen tres características fundamentales:

- Los efectos comienzan a manifestarse solo por arriba de cierto umbral de dosis.
- Existe correlación entre la rapidez de dosis y el efecto que se observa.
- Al aumentar la dosis se incrementa la severidad del efecto observado.

El valor de la dosis de umbral, depende de la radiosensibilidad del tejido que se considere.

Los efectos estocásticos son otro tipo de efectos.

Las características de estos efectos son:

- Cada efecto tiene una probabilidad de ocurrencia.
- Carecen de umbral de dosis a partir de la cual se manifiestan.
- La probabilidad de que ocurra el efecto, aumenta con el aumento de dosis.
-

Puede ocurrir que la energía depositada en la célula provoque modificaciones que se transmitan durante las sucesivas reproducciones celulares y se formen colonias de células modificadas. Este proceso puede derivar en manifestaciones cancerígenas luego de un periodo de latencia. Se les llaman efectos hereditarios si las modificaciones se producen en células germinales; éstas pueden transmitirse a la descendencia. Ejemplos de efectos estocásticos son los efectos hereditarios, la inducción de leucemias o cualquier tipo de cáncer y el acortamiento de la vida.

La exposición del cuerpo total o una gran porción de él a grandes dosis de radiación ionizante puede provocar una serie de síntomas los cuales consisten en náuseas, vomito, inapetencia, pérdida de peso, fiebre, hemorragias, necrosis de la piel, caída de cabello, necrosis de tejidos internos, esterilidad temporal o permanente, funcionamiento anormal de los órganos hematopoyéticos, alteraciones funcionales del sistema nervioso y hasta la muerte del individuo [6].

IX. VIGILANCIA RADIOLÓGICA AMBIENTAL

Los avances en el conocimiento y la mejora de las técnicas de medida de la radiactividad han permitido una mejor valoración de la radiactividad presente en el medio ambiente [7].

Las radiaciones de origen natural contribuyen de un modo global para toda la biosfera, mientras que las de origen artificial contribuyen principalmente de un modo local; al conjunto de dichas radiaciones se le conoce como fondo radiactivo. Por éste motivo surge la necesidad de la Vigilancia Radiológica Ambiental. La existencia de las descargas radiactivas globales necesita una vigilancia a nivel nacional e internacional, que permita descubrir y determinar las causas de accidentes locales y globales, así como tomar las medidas de emergencia adecuadas. En determinados territorios, donde existen fuentes radiactivas artificiales o naturales, como pueden ser las minas en explotación, la Vigilancia Radiológica Ambiental (VRA) tiene la tarea adicional de controlar escapes de radiactividad al medio ambiente, resultantes de la actividad normal de desechos de las minas. La VRA internacional descubrió de accidente de Chernobil, y en principio puede detectar la manipulación con riesgo para la población de residuos radiactivos. Los objetivos fundamentales de los laboratorios de VRA se dirigen a establecer los niveles medios de radiactividad en el territorio, para poder apreciar su variabilidad y distribución en el tiempo y en el espacio. Con estos resultados en mano, se ocupan de descubrir y vigilar los radionúclidos expulsados al medio ambiente por instalaciones nucleares, evacuación de desechos radiactivos y accidentes con descargas al medio ambiente. Toda esta actividad permite evaluar la dosis de radiación que recibe la población de las zonas bajo estudio, que se compara con los niveles máximos permisibles establecidos por las organizaciones internacionales que estudian los efectos de la radiación en los humanos y el medio ambiente, para que las autoridades competentes puedan con esa información tomar las medidas pertinentes.

La Vigilancia Radiológica Ambiental se realiza en varios medios ambientales que puedan producir dosis de radiación por exposición externa, como es el caso de los suelos, y por ingestión directa a través de las cadenas alimenticias: aire (polvo,

aerosoles, gases); suelo, sedimentos (lagos, ríos y marinos), agua (lagos, ríos, mar, lluvia, subterránea), pastos, leches, cereales, carne, pescado, etc. [8].

Algunos resultados generales de estos estudios pueden resumirse diciendo que en la radiactividad natural se detectan fundamentalmente los isótopos ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra y ^{222}Rn , así como que la precipitación del ^{137}Cs es mayor en el hemisferio Norte que en el Sur, debido a la reciente catástrofe de Chernobil.

Instalar un laboratorio central donde se apliquen los procedimientos en terrenos inexplorados, hacer el inventario de las concentraciones de diferentes radioisótopos, sus destinos, la dosis que provocan, hacer estudios de migración, de erosión de suelos, intercambio en minerales, etc., suele ser trabajo para un equipo altamente especializado, y tarea de varios años.

En México se dedican a esta tarea diversas instituciones, como son el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) y la Comisión Federal de Electricidad (Central Laguna Verde).

En algunas partes del planeta el nivel de radiación es muy elevado, siendo en general objeto de estudio minucioso. Los países más destacados son Brasil, India, Irán, República Checa, Australia y Estados Unidos. En éstos países se encuentran áreas con contenidos elevados de Uranio y/o Torio en el suelo, aguas muy radiactivas o emanaciones de Radón muy altas [9].

Para el estado de Chihuahua, y otros estados de la frontera Norte de México, se justifica un servicio de VRA, ya que en los estados fronterizos de los Estados Unidos hay numerosas instalaciones nucleares que ya han producido descargas radiactivas al medio ambiente. Como es sabido, las cuencas geográficas se comparten entre ambos países, y además existe el peligro de depósitos de material radiactivo en zonas cercanas a la frontera.

En el territorio del estado de Chihuahua, en la localidad de Aldama, estuvo operando una planta de operación de uranio para la central nucleoelectrónica de Laguna Verde en forma de "torta amarilla"; al norte del estado existe un repositorio

de material radiactivo. Además Chihuahua cuenta con yacimientos identificados de uranio, que junto con la poca precipitación pluvial, pueden conjuntar las condiciones para ocasionar concentraciones elevadas de ^{226}Ra en el agua potable, teniendo como consecuencia un riesgo de exposición a dosis de radiación inaceptables a la superficie de los huesos de la población; en Chihuahua las estadísticas indican que el cáncer de pulmón produce más muertes que en el promedio de todo México.

El programa de Vigilancia Radiológica Ambiental que se lleva a cabo para el estado de Chihuahua, contempla realizar estudios en ciudades con mayor importancia así como sus características físicas, geológicas y demográficas. Una de estas ciudades muy importantes es la ciudad de Aldama, la cual se encuentra localizada en la zona noreste del estado, pretendiendo así, abarcar la Vigilancia Radiológica Ambiental en esta zona. La ubicación y características importantes en este municipio se presentan a continuación.

Aldama, Chihuahua.

Se localiza en la latitud norte $28^{\circ} 50'$, longitud oeste $105^{\circ} 53'$; con una altitud de 1,262 metros sobre el nivel del mar. Colinda al norte con Ahumada y Coyame, al este con Ojinaga y Coyame, al sur con Aquiles Serdán y Julimes y al oeste con Chihuahua [10].



Figura H. Localización del municipio de Aldama en el estado de Chihuahua.

La Cabecera Municipal se encuentra aproximadamente a 30 kilómetros de la Capital del Estado y cuenta con 19 localidades. Los principales núcleos de población son Aldama, Cabecera Municipal; las secciones municipales de San Diego de Alcalá, Placer de Guadalupe, El Pueblito y Maclovio Herrera.

El Municipio de Aldama tiene una superficie de 9,835.90 kilómetros cuadrados, ocupa el 5o. lugar por superficie en el Estado, lo cual representa el 3.9% de la extensión territorial estatal y 0.50% de la nacional.

En su mayor parte es desértico, con sierra riscosa de la Meseta Central del Norte. Tiene once serranías, de las cuales, en dos existe material radiactivo (uranio); las principales son: Dolores, Santo Domingo, Olanes, El Soldado, El Morrión, Tasajera y El Mimbres.

Fluyen los ríos Chuviscar y Conchos, este último pertenece a la vertiente del Golfo y viene de Julimes. Posteriormente sus aguas llegan a Coyame [11]. Existe una región que corresponde a la zona semidesértica en donde las aguas pluviales se pierden en las hondonadas del terreno.



Figura I. En el Municipio se localiza la presa “Luis L. León” (El Granero).

El clima en el municipio de Aldama se puede clasificar como árido, desértico y extremo; con una temperatura máxima de 44° C y una mínima de 14° C.

La precipitación pluvial media anual en el Municipio es de 305.2 milímetros, con una humedad relativa del 45% y un promedio de 49 días de lluvia. Los vientos dominantes provienen del oeste.

Principales Ecosistemas

La vegetación existente es matorral inerme perifollo en lomeríos quebrados, con gobernadora en sus hondonadas.

Sus pastizales se consideran de tercera clase, así como su bosque. Las plantas que predominan son xerófilas, herbáceas, arbustos de diferentes tamaños entremezclados con algunas especies de agaves, yuca, cactáceas y leguminosas como: huisache, guamúchil, retama, zacate y peyote.



Figura J. Vegetación predominante en el municipio de Aldama.

La fauna la conforman: la paloma güilota y alas blancas, conejo, liebre, venado bura, berrendo, puma, gato montés, coyote, serpientes de cascabel, culebras y roedores.

Características y Uso del Suelo

Tiene mesetas y terrenos semidesérticos. En 2 de las 11 sierras existentes hay mineral de uranio.

El uso predominante del suelo es ganadero y agrícola. La tenencia de la tierra en su mayoría es privada con 753,150 hectáreas, equivalentes al 73.5%. El régimen ejidal comprende 250,704 hectáreas que representan el 24.5%; a usos urbanos corresponden 587 hectáreas que significan el 0.067% del suelo total (Ver Tabla 4).

Evolución Demográfica.

El Municipio cuenta con 20,390 habitantes, de los cuales el 50.7% son hombres y el 49.3%, mujeres. La tasa de natalidad es del 2.2%, la tasa general de mortalidad es 0.4% y la tasa de mortalidad infantil es de 0.04% [12], ver Tabla 5.

Vivienda.

El agua potable se abastece de 3 pozos profundos, cuyo volumen promedio diario de extracción es de 6,190 m³ (Ver Tabla 6).

VIGILANCIA RADIOLÓGICA AMBIENTAL EN ALDAMA, CHIHUAHUA.

Como se mencionó anteriormente, las rocas, el suelo y diversos materiales, tienen alguna cantidad de elementos radiactivos como uranio y torio, los que en sus cadenas de desintegración generan isótopos que producen exposición interna como externa.

El Uranio es encontrado en todas las rocas y suelos; generalmente se halla concentrado en rocas metamórficas, granito, lignito y depósitos de fosfatos [13].

El Uranio encontrado en la naturaleza consiste en tres isótopos: ²³⁴U, ²³⁵U y ²³⁸U. En la corteza terrestre, el ²³⁸U está presente en cantidades del 99.27%, el ²³⁴U en cantidades del 0.006% y el ²³⁵U, el isótopo presente de la serie del Actino, se encuentra presente en cantidad de 0.72%.

El Uranio debe ser oxidado antes de ser transportado al agua, una vez en solución recorre grandes distancias. El Torio es extremadamente insoluble por lo que no está sujeto a movilización en la mayoría de los ambientes de agua.

Los isótopos de Radio están presentes en el agua como productos de desintegración de las series del Uranio y el Torio. Como consecuencia de la presencia del Uranio y el Torio en rocas y suelos, los radionúclidos de Radio son también elementos traza en éstos medios naturales [14].

El ^{226}Ra es el quinto miembro de la serie del ^{238}U , tiene una vida media de 1622 años aproximadamente y se desintegra por la emisión de partículas alfas. Por otra parte, el ^{228}Ra es el segundo miembro de la serie de ^{232}Th , con una semivida de 5.7 años y se desintegra por la emisión de partículas betas. La vida media relativamente corta de éste isótopo, limita su transporte en comparación con la mayor vida del ^{226}Ra .

El ^{226}Ra es un componente natural del agua subterránea en un rango muy amplio de actividades. La concentración del ^{226}Ra en esta fuente de agua depende de factores importantes como son los medios por los cuales llega al agua, la cantidad de Radio en la fuente, así como los medios de movilización de este isótopo en el acuífero. Diversas investigaciones han concluido que aguas con valores altos de ^{226}Ra presentan en su composición un nivel más bajo de sales solubles como es el caso de acuíferos asociados con piedras areniscas. También se cree que diversos factores como la acidez del agua (pH bajos) y elevadas concentraciones de nitratos asociados con actividades agrícolas, incrementan la cantidad de ^{226}Ra disuelto en el agua subterránea [14].

El ^{222}Rn , de todos los radioisótopos que contribuyen a la radiación natural y a la cual estamos expuestos, presenta un gran riesgo para la salud, por lo que esta fuente radiactiva está siendo muy estudiada en nuestros tiempos.

Existen tres isótopos de Radón que ocurren naturalmente, el ^{222}Rn , isótopo que se le conoce con ese mismo nombre, el ^{220}Rn llamado Torón y el ^{219}Rn denominado Actinón. Estos isótopos ocurren naturalmente en las cadenas de desintegración del ^{238}U , ^{232}Th y ^{235}U respectivamente. El Actinón tiene una vida media muy corta

de 3.96 segundos, el Torón posee una vida media 55.6 segundos, teniendo así poca oportunidad de escapar e interactuar con el agua y el aire.

El ^{222}Rn es un gas radiactivo natural que se origina de la desintegración del ^{226}Ra , y a su vez de ^{238}U . El ^{226}Ra actúa como una fuente permanente de Radón. El ^{222}Rn de número atómico 86, tiene una vida media relativamente grande de 3.82 días, teniendo mayor oportunidad de ser distribuido hacia el agua y el aire, es un gas sin color, sin sabor y sin olor. El Radón es soluble en agua, debido a esto hay gran preocupación para la salud pública cuando se encuentra presente en el agua de consumo. Siendo un gas, el Radón tiene la habilidad de migrar a través de los medios porosos mediante difusión, como lo es en materiales rocosos. Además el Radón tiene una baja solubilidad en agua, siendo propenso a desorberse y escapar del agua cuando entra en contacto con el aire (propiedad utilizada para su extracción y determinación) especialmente si el agua es calentada o agitada [15].

Riesgos de la ingestión de Radón.

La principal preocupación asociada a la exposición del radón en el aire, es el cáncer del pulmón, ya que el Radón por sí mismo, es un factor de riesgo, debido a que, al estar dentro de los pulmones irradia directamente a éste órgano y además sus productos de desintegración son también radiactivos y pueden ser depositados en el tejido tracto respiratorio de dos formas:

- Al desintegrarse el Radón dentro de los pulmones, los isótopos que se forman están en estado sólido por lo que se adhieren a las paredes del tracto respiratorio
- Cuando son inhalados junto con partículas, debido a que los productos de desintegración del Radón son cargados eléctricamente cuando se forman y éstos tienden a unirse a polvos presentes en la atmósfera.

Estos factores contribuyen con la irradiación de partículas alfa a las células cercanas al sitio de deposición, lo que produce un incremento en el riesgo de cáncer del pulmón [16].

Por otra parte, el Radón disuelto en el agua, puede seguir dos vías diferentes para entrar al cuerpo humano, primeramente, debido a que el Radón escapa fácilmente del agua por agitación, en muchos usos del agua se libera el gas contenido en ésta hacia el aire, contribuyendo así a la concentración de Radón en el aire y entrar en el cuerpo humano a través del sistema respiratorio. Además la ingestión de Radón en el agua posee un riesgo directo a la salud, ya que éste gas y sus productos de desintegración de corta vida (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{214}Po) irradian las células del tracto gastrointestinal, principalmente el estómago ya que es la puerta de entrada de la ingestión del Radón, difundiéndose éste dentro y a través de las paredes de este órgano. Durante este proceso el Radón entra en contacto con las células que son radiosensitivas, recibiendo así, una dosis de radiación de partículas alfas emitidas por el Radón y sus productos de desintegración que son creados en las paredes del estómago. Posteriormente, pudiendo pasar a través de la pared del estómago, el radón y sus hijos son absorbidos en la sangre y transportado por todo el cuerpo, entregando dosis de radiación a otros órganos y tejidos [17].

NORMATIVIDAD PARA ^{222}Rn EN AGUA.

Para que el agua sea adecuada y pueda considerarse segura para el consumo humano, su contenido de agentes biológicos, químicos y radiactivos potencialmente contaminantes, debe ajustarse a los niveles recomendados por organismos internacionales de salud como son los señalados por la propia Organización Mundial de la Salud (OMS), o bien a las regulaciones impuestas por las entidades gubernamentales en cada país.

En México, los límites máximos permisibles para la radiactividad en agua que recomienda la OMS están implementados en la Norma Oficial Mexicana NOM-

127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización.

Una fuente de información adicional e importante respecto a la normatividad para el contenido de sustancias radiactivas presentes en el agua potable es la Agencia de Protección al Ambiente (EPA), cuyos límite máximo permisible de ^{222}Rn es de 11Bq/L o 300 pCi/L; el consumo de agua conteniendo ^{222}Rn que exceda éste límite puede tener el riesgo creciente de contraer cáncer, principalmente en el estomago [18].

NORMATIVIDAD PARA ^{222}Rn EN AIRE DE INTERIORES.

La concentración del Radón en interiores es acumulativa, esto dependiendo de diversos factores. Sin embargo, los más importantes son:

- La cantidad de ^{226}Ra que contiene el tipo de suelo en el lugar y alrededor de la construcción.
- La permeabilidad de los materiales de construcción así como la del terreno.
- La diferencia de presión entre el interior y el exterior.

En la actualidad, también se ha estudiado el contenido de Radón en los materiales de construcción, sobre todo aquellos que han sido manufacturados como un subproducto de la producción de fertilizantes fosfatados, por lo que también se les atribuye parte de la concentración de Radón en interiores, pero la contribución de radón de éstos materiales también es muy pequeña.

A nivel mundial, se han encontrado países con niveles de ^{222}Rn elevados (2.5 pCi/L), mientras que recientemente en Australia se encontraron concentraciones de Radón promedio de 0.3 pCi/L.

Los niveles de ^{222}Rn en edificios comerciales e industriales han sido generalmente mucho menores a los encontrados en residencias [19].

En México, se han realizado estudios de concentración de Radón en el aire por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), el ININ y el

CREN-UAZ. La CNSNS tiene un programa de medición de Radón en toda la Federación. En Chihuahua se han realizado pocas mediciones, obteniendo como valor máximo para el invierno de 1998 un promedio de 6.7pCi/L [20].

Sobre la regulación existente para el ^{222}Rn en interiores, sólo la EPA lo contempla, pero no está establecido como *límite máximo*, ya que la inhalación de radón contribuye al riesgo de contraer cáncer del pulmón, y esto es un efecto estocástico (sin umbral). Sin embargo, marca un nivel que denominan de intervención con un valor de 4pCi/L en aire de interiores, debido a que es el doble del nivel de concentración de radón (2 pCi/L) que es muy difícil reducir en los domicilios.

METODOLOGÍA

ESPECTROMETRÍA GAMMA.

El objetivo de la espectrometría γ es obtener las actividades de los diferentes isótopos radiactivos, contenidos en una muestra dada. En uno o varios experimentos se registra el espectro de la radiación emitida por la muestra, se obtienen las energías de las líneas, se determinan sus intensidades, y se identifican a que isótopos pertenecen esas líneas.

La primera etapa de estos experimentos consiste en la calibración en energía del espectrómetro. La determinación de las intensidades de las líneas se basa en medir con exactitud y precisión el área neta bajo el pico de la línea dada, y en tener la función que describa la eficiencia de detección para la geometría del experimento para el intervalo de energías que nos interesa. La identificación de los isótopos se realiza a partir de la presencia de las líneas más intensas que se emiten por un isótopo dada en el espectro de la muestra, teniendo en cuenta que posean la relación adecuada entre sus intensidades, y es un procedimiento típico de prueba y error, que se realiza usando tablas estandarizadas y se puede ejecutar en la computadora [21].

Es importante escoger adecuadamente el tipo de detector para cada experimento, debido a que la resolución juega un papel muy importante al decidir confiable o no de un pico dado en un espectro. La *resolución* de un espectrómetro es su capacidad de diferenciar efectos diferentes pero cercanos. En el caso de los espectrómetros que miden energías la resolución consiste en la capacidad de distinguir los máximos de picos contiguos. Esta capacidad de separar picos se relaciona con el ancho de un pico individual, y se considera que si la diferencia en energía entre dos picos es mayor que el ancho de la mitad de la altura del pico individual, entonces las dos líneas se separan.

$$R = \frac{FWHM}{H_0} \quad (29)$$

Donde:

FWHM = ancho a la mitad de la altura (en keV).

H₀ = posición del pico (en keV).

Por otra parte, al escoger un detector es muy importante analizar también la *eficiencia de detección* del mismo, pues refleja la capacidad de registro de la radiación en estudio. La eficiencia de detección, relaciona el número de eventos registrados como resultado de la interacción de un haz de radiación con el detector y la cantidad de partículas emitidas por la fuente en estudio, que depende de su actividad y determina la intensidad de este haz.

La magnitud eficiencia definida manifiesta siempre dependencia con la energía de la partícula o cuanto incidente en el detector, y por supuesto con las dimensiones y material del mismo, porque de estos depende la probabilidad de interacción de las partículas dentro del detector.

Eficiencia Total:

$$\epsilon_{\text{total}} = \frac{\text{no. de pulsos registrados de cualquier amplitud}}{\text{no. de cuantos de radiación incidente en el detector}}$$

Si la función de respuesta tiene un pico de absorción total:

$$\epsilon_p = \frac{\text{no. de pulsos registrados en el pico de Absorción total}}{\text{no. de cuantos de radiación incidente en el detector}}$$

La eficiencia experimental se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\epsilon_p = \frac{A_n}{A_0 e^{-\lambda t_d} I_\gamma t_v} \quad (30)$$

Donde:

A_n = Área neta del fotopico, corregida por tiempo muerto.

A_0 = Actividad inicial de cada isótopo.

$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ = Constante de desintegración del isótopo en cuestión.

$T_{1/2}$ = Período de semidesintegración del radioisótopo.

I_γ = Factor de emisión gamma o intensidad absoluta de la transición.

t_v = Tiempo vivo en que fue medida la muestra.

$e^{-\lambda t_d}$ = Factor de desintegración.

Otra magnitud importante en un sistema de espectrometría gamma es el *fondo*, que se define como todos aquellos pulsos que no contribuyen constructivamente con las líneas o picos que identifican las transiciones gamma de las desintegraciones radiactivas de los radionúclidos que se encuentran en la muestra.

El fondo depende del tipo de radiación que sea capaz de registrar el detector, de los materiales que lo rodean, de las condiciones de operación del sistema de conteo, y del aislamiento que rodea al detector durante su medición.

Tomando en cuenta el origen, el fondo esta constituido por dos componentes: fondo en ausencia de muestra, y fondo debido a la muestra.

Fondo en ausencia de muestra.- Es producto de la radiactividad contenida en los materiales del laboratorio, equipo de detección, radiación cósmica, y el ruido electrónico. Los materiales con los que se construye el equipo de medición y los materiales de laboratorio contienen concentraciones pequeñas de radionúclidos naturales, fundamentalmente ^{40}K y radionúclidos de las series radiactivas naturales del ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th . Los materiales más adecuados que son utilizados como aislante, reduciendo así el fondo en ausencia de muestra que es causado por la radiactividad del medio ambiente que rodea al detector, son el plomo y el hierro, ya que estos poseen una alta sección eficaz fotoeléctrica, debida a su elevado número atómico.

Fondo debido a la muestra.- Tiene su origen en interacciones que no producen efecto fotoeléctrico en el detector. La dispersión Compton produce la mayor contribución al fondo continuo, originando los bordes de Compton y los picos de retrodispersión.

Existen varios métodos que son utilizados para determinar el área neta de un pico mediante la sustracción del fondo. Para sustraer el fondo producido por la muestra, así como el fondo del laboratorio se emplea el método evaluación simple área-pico.

El método de evaluación simple área-pico consiste en seleccionar un determinado rango de canales a ambos lados del pico para así definir el fondo bajo el pico. El fondo es restado para crear una función lineal, y la región del pico es considerada como una función Gaussiana, obteniendo el semiancho del pico w (donde $w = \text{FWHM}$), y posteriormente el área de la Gaussiana.

El área N_s es el área del pico más el área del fondo que hay bajo él. Está determinada por la suma de los conteos de los canales que están en un rango definido bajo la Gaussiana y tiene su centro en el canal que tiene el mayor número de conteos. El rango que define al pico debe de tener un ancho razonable, y de

acuerdo a estudios realizados el rango idóneo es de entre $2w$ y $3w$. Para un rango de $2.55w$ el 99.7% del área de una función Gaussiana esta incluido.

Los rangos seleccionados a ambos lados del pico deberán tener aproximadamente un número de canales igual a la mitad del número de canales bajo el pico, y el área de cada rango será la suma de sus conteos.

El fondo que será restado para obtener el área neta del pico (A_n) se determina sumando las áreas de los rangos que están a sus lados:

$$N_b = N_{b,l} + N_{b,r} \quad (31)$$

Donde:

N_b = Área del fondo del pico.

$N_{b,l}$ = Área del fondo del lado izquierdo del pico.

$N_{b,r}$ = área del fondo del lado derecho del pico.

El área neta del pico se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$A_n = N_s - N_b \quad (32)$$

Donde:

A_n = Área neta del pico.

N_s = Área del pico más el área del fondo.

N_b = Área del fondo bajo el pico.

I. DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE RADIOACTIVIDAD EN SUELO.

1. Puntos de muestreo.

Para el municipio de Aldama, Chihuahua, se tomaron 30 muestras de suelo y 4 replicas para control de calidad, los puntos están tomados en los alrededores de la ciudad y terrenos cercanos a la antigua planta de URAMEX.

2. Toma y preparación de muestras.

Para obtener las muestras de suelo que nos permitirán determinar la concentración de actividad de los radionúclidos presentes en él, se usa el método utilizado por el REVIRA (Red de Vigilancia Radiológica) [22].

El equipo y material usado para la toma de muestras de suelo es el siguiente:

- Plantilla o marco metálico de 50 X 50 X 5 cm.
- Pala pequeña
- Cepillo
- Bolsas de plástico, etiquetas adhesivas.

Pasos a seguir para la toma de muestras:

- Se introduce la plantilla metálica en el terreno a muestrear.
- Con la pala se recoge la tierra contenida dentro del área delimitada por la plantilla, hasta la profundidad marcada por ésta.
- En caso de existir piedras de tamaño apreciable, dentro del área delimitada por la plantilla, se procede a cepillar el polvo existente en ellas y es añadido a la muestra desechando las piedras.
- La muestra se introduce en una bolsa plástica la cual será etiquetada.
- La etiqueta debe contener la fecha exacta y localización del punto de muestreo.

Cada muestra es homogenizada y posteriormente se tomarán 2.0 L de cada muestra, los cuales llevarán un proceso de preparación, antes de ser medidos.

Los pasos que se llevan a cabo para preparar las muestras son los siguientes:

Molienda: cada una de las muestras es sometida a un proceso de molienda, donde las muestras se hacen pasar primeramente por un molino de rodillos, minimizando el tamaño de piedras y granos de tierra. Posteriormente la muestra pasa por un molino de discos, obteniendo así, un grano de tamaño muy fino.

Cribado: las muestras después de ser molidas pasan a través de un proceso de cribado, para ello se utiliza la malla número 20 (2mm), la muestra es colocada en un equipo llamado Rop Tap. La parte de la muestra que no pasa a través de la malla es sometida nuevamente al proceso de molienda y de cribado hasta pasar por la malla.

Secado: posterior al cribado las muestras se ponen a secar durante 48 horas a temperatura ambiente, luego son colocadas en un horno a 105°C durante 24 horas, para eliminar toda el agua que pudiera contener.

Una vez cumplidas las 24 horas, se toma 1L y es colocada dentro de un recipiente especial llamado “marinelli”, el cual es sellado para evitar fugas de gas radón.

Antes de ser medida se espera alrededor de 30 días, para que el ^{222}Rn alcance equilibrio secular con sus hijos para medir la actividad de la cadena de desintegración del ^{238}U a través de la de sus hijos ^{214}Bi y ^{214}Pb .

3. Medición de las muestras.

Una vez que las muestras cumplen 30 días empaquetadas, se procede a medirlas en el equipo de espectrometría gamma durante 22 horas. El equipo con que cuenta el laboratorio de Vigilancia Radiológica Ambiental de CIMAV, es detector de Germanio Hiperpuro (HPGe).

Un espectrómetro gamma consiste esencialmente en un detector de rayos gamma, un amplificador de los pulsos que salen del detector y un analizador de las energías.

El detector HPGe, consiste en un diodo de Germanio de altísima pureza, donde la zona aislante o activa está formada por un monocristal de Germanio que al ser polarizado en inversa no conduce la corriente eléctrica. Para ello, el detector tiene que ser enfriado a la temperatura del nitrógeno líquido (77K).

Así, los rayos gamma provenientes de la muestra, interactúan en el monocristal del detector mediante los mecanismos de interacción de los rayos γ en el detector (Fotoeléctrico, Compton y Formación de pares), produciendo ionización en forma de electrones y huecos para luego ser colectados en electrodos en forma de pulsos de pequeña amplitud para luego ser amplificados en un preamplificador y amplificador, saliendo pulsos de amplitud proporcional a la carga colectada en el detector y por lo tanto a la energía de los electrones producidos por los efectos de interacción.

Posteriormente éstos pulsos son clasificados en un convertidor analógico digital, el cual mide la altura de los pulsos y los clasifica, colocándolos en una matriz de canales, y en general, muestrea digitalmente el contenido de cada canal.

En el detector de Germanio Hiperpuro del laboratorio de Vigilancia Radiológica Ambiental en el CIMAV es de forma cilíndrica, con un volumen activo de aproximadamente 80 cm^3 y un blindaje de plomo de 16 cm de espesor para minimizar el efecto de la radiactividad ambiental presente en el laboratorio (Figura K). La eficiencia relativa del detector es del 20%, respecto de un detector de NaI(Tl) de 10 cm de diámetro por 10 cm de altura. La eficiencia en función de la energía de los rayos gamma se determinó experimentalmente con una muestra de suelo preparada en el CREN-UAZ sobre la base de una solución multi-isotópica preparada por el ININ con un certificado de Isotopes Products. La eficiencia se comprobó separadamente con el programa EGS4 por simulación de Monte Carlo [23]. Las áreas netas de los isótopos de interés fueron elaboradas mediante el código de procesamiento de espectros gamma SpectrumZoom [24]. Este programa fue diseñado en C++ para el programa de Vigilancia Radiológica Ambiental de CIMAV. El fondo del laboratorio se determinó mediante tres

mediciones independientes de una semana cada una, luego se promediaron y se normalizaron a 22 horas, ya que éste es el tiempo de medición de cada muestra.

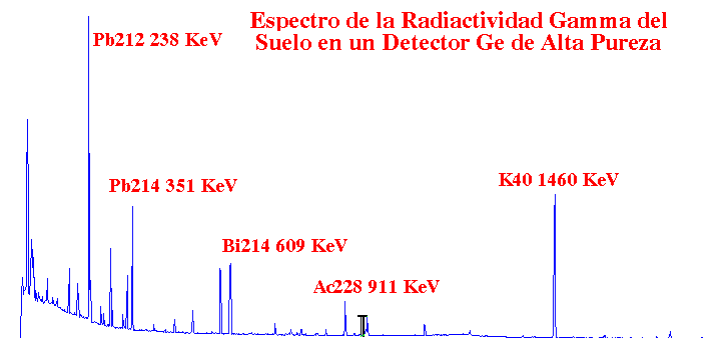


Figura K. Detector HPGe del laboratorio de VRA en CIMAV y ejemplo de espectro de muestra de suelo, como respuesta del detector HPGe.

4. Cálculos.

La expresión utilizada para el cálculo de la actividad de cada radionúclido es:

$$A = \frac{A_n}{\epsilon I_\gamma t} \quad (33)$$

Donde:

A = Actividad del radionúclido (Bq).

A_n = Área neta del fotopico.

I_γ = Intensidad absoluta de la transición.

t = tiempo de medición de la muestra (seg).

ϵ = Eficiencia.

Para el cálculo de la actividad específica de cada radionúclido:

$$A_{\text{esp}} = \frac{A}{m} \quad \text{ó} \quad A_{\text{esp}} = \frac{A}{V} \quad (34)$$

Donde:

A_{esp} = actividad específica del radionúclido (Bq/kg).

m = masa de la muestra (kg).

V = volumen de la muestra (L).

Como el equipo utilizado para la medición no detecta la radiación gamma que emiten los isótopos de ^{238}U y ^{232}Th al desintegrarse, el cálculo de sus actividades se calcula a partir de las actividades de sus hijos.

Para el cálculo de la actividad de la serie del ^{238}U , se utilizan las actividades de sus hijos ^{214}Pb (351 KeV) y del ^{214}Bi (609 KeV); el cálculo de la actividad de la serie del ^{232}Th se obtiene mediante las actividades de sus hijos ^{212}Pb (238 KeV) y ^{228}Ac (912 KeV). De acuerdo a la siguiente expresión se calculan las actividades de las series del ^{238}U y ^{232}Th :

$$A_j = \frac{\sum \frac{A_i}{\sigma_i^2}}{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (35)$$

Donde:

A_j = Actividad específica de la serie radiactiva j (Bq/kg).

A_i = Actividad específica del radionúclido i (Bq/kg).

σ_i = Error absoluto del radionúclido.

El error absoluto de las series del ^{238}U y ^{232}Th se calcula usando la siguiente expresión:

$$\bar{\sigma}_j = \left(\sqrt{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \right)^{-1} \quad (36)$$

Donde:

σ_j = Error absoluto de la serie radiactiva j (Bq/kg).

σ_i = Error absoluto del radionúclido i (Bq/kg).

La dosis anual afectiva H_E originada por las series radiactivas y el ^{40}K es calculada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$H_E \text{ (nSv h}^{-1}\text{)} = 0.35C_U + 0.51 C_{Th} + 0.033 C_K \quad (37)$$

Donde:

C_U = actividad específica del ^{238}U (BqKg⁻¹).

C_{Th} = actividad específica del 232 (BqKg⁻¹).

C_K = actividad específica del ^{40}K (BqKg⁻¹).

II. DETERMINACION DE RADON EN INTERIOR DE DOMICILIOS.

1. Puntos de muestreo

Para determinar la concentración de ^{222}Rn en aire, dentro de domicilios en la ciudad de Aldama, Chih., el trabajo se realizó en dos temporadas invernales; la primera etapa se realizó en Febrero de 2002, fue un tamizaje donde se tomaron 19 muestras. La segunda etapa se realizó en Enero de 2003, este fue un muestreo aleatorio de 34 muestras.

2. Toma y preparación de muestras

Los dispositivos de carbón activado que se utilizan, antes de ser colocados, pasan por un proceso de desorción, en el cual se someten a una temperatura de 110°C en un periodo de 20 horas, y posteriormente son etiquetados.

Los dispositivos de carbón activado se colocan principalmente en la habitación de la cámara, donde permanecen expuestos al aire del interior en un periodo aproximado de 3 días, al ser retirados se sellan inmediatamente con cinta adhesiva.

3. Medición de muestras

Para su lectura son llevados al laboratorio de Vigilancia Radiológica Ambiental, una vez que hayan alcanzado el equilibrio radiactivo (más de 3 horas).

El detector con que cuenta el laboratorio y que es utilizado para este fin, es el detector de NaI(Tl), el cual cuenta con un cristal de 3X3 pulgadas, fotomultiplicador electrónico(FME)–preamplificador, y blindaje de plomo adecuado. Este detector es de centelleo, transforma la energía que pierde la partícula ionizante que lo atraviesa en destellos luminosos. Estos inciden en el fotocátodo de un fotomultiplicador electrónico(FME), y a la salida resulta un pulso electrónico de amplitud proporcional a la energía depositada en el centellante.

El detector de NaI(Tl) es constituido por un monocristal inorgánico. Entre todos los centellantes es el que presenta mayor conversión de energía disipada por la partícula cargada en energía de los fotones visibles, su respuesta es prácticamente lineal en intervalo de energías de 0.001 a 2 MeV. Tiene alta densidad y alto número atómico, por ello que es muy útil para la detección de rayos γ .

El mecanismo de conversión de la energía de los rayos γ en destellos luminosos comienza con la interacción del rayo en el monocristal de NaI(Tl), por uno de los tres efectos más importantes, el fotoefecto, el efecto Compton y la formación de pares electrón – positrón.

El centellante de NaI(Tl) se acopla ópticamente al FME para que la mayor cantidad posible de los fotones emitidos en el cristal lleguen hasta el fotocátodo. El FME es un tubo de cristal al vacío con un fotocátodo semitransparente a la

entrada, donde los fotones incidentes desde el centellante producen fotoefecto. Los electrodos de enfoque conducen a los fotoelectrones hacia el primer dinodo. Los dinodos son un serie de N electrodos conectados a potencial creciente, donde cada electrón incidente produce un numero δ de electrones de salida, y después éstos son acelerados hacia el siguiente dinodo. La serie de dinodos termina en el ánodo, donde se colectan todos los electrones producidos y se obtiene un pulso espectrométrico, de amplitud proporcional a la cantidad de fotones incidentes en el fotocátodo, y por lo tanto relaciona linealmente con la energía depositada por la partícula en el cristal centellante.

Para la medición , la lectura se realiza en la zona de las lineas mas intensas de los hijos del Radon como son 295, 351 y 609 KeV, esto previamente calibrado con una fuente de ^{226}Ra en equilibrio con el ^{222}Rn de actividad certificada con la firma ISOTOPES PRODUCTS, de la misma composición y geometría que los dispositivos, además de un blanco, el cual es un dispositivo nunca abierto. El tiempo de medición que se utiliza par tener buena estadística es de 30 minutos. En la figura L se muestra un ejemplo de un espectro de medición de concentración de ^{222}Rn .

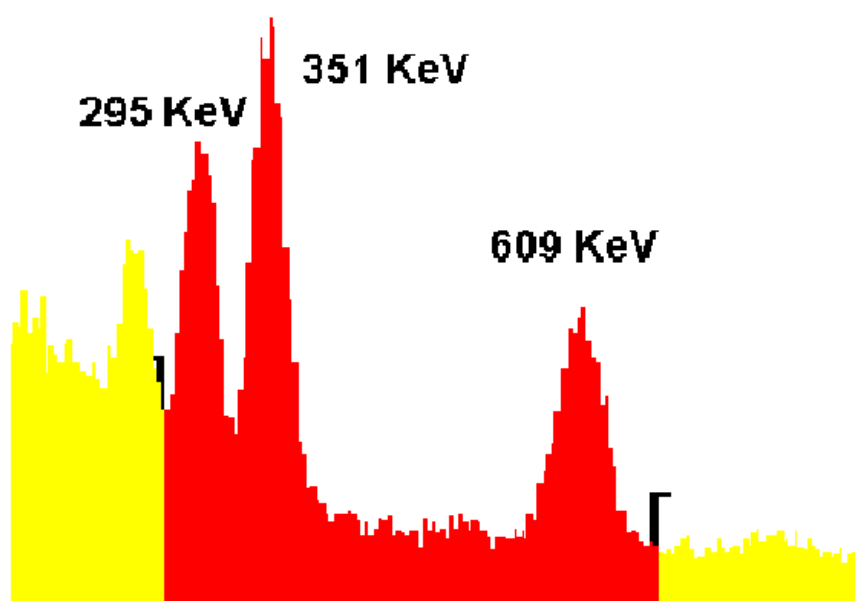


Figura L. Ejemplo de espectro de adsorción de ^{222}Rn en CA.

4. Cálculos.

Para la determinación de la actividad de Radón en interior de domicilios, se efectuó la calibración para las latas de carbón activado, el cual fué realizado por compañeros del Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental, obteniendo el factor de calibración cohen [25].

El coeficiente de calibración Cohen el cual está en función del tiempo de exposición de la lata de carbón activado se calcula por la expresión:

$$\text{cohen} = k * m \left(1 - \frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_a} \right) * \left(\frac{1 - e^{-\lambda_a t_{\text{exposición}}}}{t_{\text{exposición}}} \right) \left[\frac{L_{\text{aire}}}{t} \right] \quad (38)$$

Donde:

k = coeficiente de adsorción (4.1 ± 0.2 litros/gramo) [26].

λ_{Rn} = Constante de desintegración del radón.

λ_a = constante de adsorción-desorción en la lata de carbón activado en una cámara grande de flujo constante.

Mientras que la actividad en el aire esta dada por:

$$A = \frac{(\text{lectura} - \text{blanco}) * e^{(\lambda_{Rn} * t_c)}}{\varepsilon * \text{cohen} * t_{\text{exposición}}} \left[\frac{Bq}{L} \right] \quad (39)$$

Donde:

t_c = tiempo transcurrido desde el momento en el cual se cerró el CABD hasta que se realiza su medición.

λ_{Rn} = Constante de desintegración del radón

La dosis anual efectiva H_E originada por la inhalación de Radón, se calcula de acuerdo a la siguiente expresión (UNSCEAR (B), 2000):

$$H_E = C_{Rn} E_q T 9 \text{ nSv (Bq h m}^{-3}\text{)}^{-1} \quad (40)$$

Donde:

C_{Rn} = es la concentración promedio de radón en aire (Bq m^{-3}).

E_q = factor de equilibrio entre el radón y sus progenitores en aire de interiores (0.4).

T = tiempo de exposición (horas).

$9 \text{ nSv (Bq h m}^{-3}\text{)}^{-1}$ = factor de conversión de dosis.

III. DETERMINACIÓN DE RADÓN EN AGUA POR EL MÉTODO DE CENTELLEO LÍQUIDO.

Principio Básico del Centelleo Líquido:

El análisis de centelleo líquido es una técnica que ha adquirido gran popularidad para la detección y medición cuantitativa de la radiactividad desde 1950. Esa gran popularidad del análisis de centelleo líquido es debido a grandes ventajas como son altas eficiencias de detección, facilidades en las técnicas de preparación de muestras, gran variedad de usos como son la espectrometría alfa y beta.

Esta técnica ha permanecido en la investigación científica y ambiental como una de las herramientas experimentales más usadas para el análisis cuantitativo de radionúclidos, siendo el método más comúnmente empleado para la medición de Radón en el agua.

El contador de radioisótopos por centelleo líquido, tiene su origen en que ciertos químicos orgánicos (coctel centellador) emiten destellos luminosos al ser bombardeados por la radiación nuclear.

El coctel centellador tiene dos componentes principales, el solvente orgánico (diisopropilnaftaleno, seudocumeno ó un alquilbenceno lineal) y un centellador orgánico (2,5 difeniloxazole).

El proceso de centelleo líquido que ocurre es la interacción de los radionúclidos con las moléculas del solvente en el coctel. Esas moléculas del solvente aceptan fácilmente la energía alcanzada en el proceso de desintegración nuclear formándose moléculas activas o excitadas del solvente. El centellador orgánico, el cual es soluble en el solvente, puede aceptar con gran facilidad la energía de las moléculas activas del coctel, produciendo ahora moléculas del centellador excitadas. Esas moléculas pierden esa energía rápidamente, retornando a su estado original mediante un mecanismo de fluorescencia. Así, ésta energía es entonces liberada como un destello de luz y la intensidad de la luz emitida refleja la energía original de desintegración nuclear y el número de destellos luminosos

es proporcional al número de desintegraciones nucleares ocurridas en la muestra [27].

La tarea más importante del analizador de centelleo líquido es la detección y cuantificación del número de destellos luminosos y su correspondiente intensidad. Para esto, primeramente la muestra es cargada dentro de la cámara de conteo del analizador (forma de pozo) y los destellos luminosos emitidos, son detectados por un tubo fotomultiplicador.

El tubo fotomultiplicador convierte los fotones de luz emitidos a electrones cuando los fotones chocan en un fotocátodo localizado dentro del tubo fotomultiplicador. Posteriormente los electrones producidos en el fotocátodo son amplificados a través de una serie de dinodos cargados positivamente, donde cada dinodo tiene un voltaje creciente a lo largo de la serie, para luego ser los electrones colectados en el ánodo del tubo fotomultiplicador. Así la luz emitida en el vial de centelleo, es entonces convertida a una señal electrónica correspondiente. Posteriormente ésta señal electrónica es enviada a un convertidor analógico digital el cual convierte ésta señal a un simple número que representa la altura del pulso o intensidad correspondiente. Finalmente estos pulsos digitales son ordenados o clasificados en base a su magnitud o altura mediante un analizador multicanal (MCA) que consiste en una serie de cajones, donde las diferentes magnitudes o alturas de pulso son colocados una vez que han sido detectados.

Sin embargo, en el análisis de centelleo líquido suelen presentarse algunas interferencias para obtener valores reales. Estas interferencias son:

Radiación de fondo.- Se refiere a toda radiación externa a la muestra, como radiación cósmica o ambiental, ruido causado por la electrónica del equipo, etc. Para ello, se determina la velocidad de conteo del fondo, midiendo un vial que contenga el centellante y todos los constituyentes usados en la preparación de la muestra con la excepción del radionúclido de interés.

$$\text{CPM}_{\text{netos}} = \text{CPM}_{\text{muestra}} - \text{CPM}_{\text{fondo}}$$

Efectos por el tipo de recipiente.- Cuando las muestras son contenidas en viales de plástico, el centellador orgánico puede penetrar la pared del vial. Además el fondo puede variar dependiendo del tipo de material del vial (vidrio o polietileno).

1. Puntos de muestreo.

Para determinar la concentración de ^{222}Rn en agua de consumo, se tomaron muestras tanto en domicilios como en pozos en Cd. de Aldama, Chih., el trabajo se realizó en Enero de 2003, se muestrearon 28 domicilios de manera aleatoria y se tomando muestras de los tres pozos que abastecen la ciudad.

2. Preparación de muestras.

Para la toma de muestras las recomendaciones hechas por la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Agencia de Protección al Ambiente (EPA) para el Radón en Agua.

1. Las muestras se toman en viales de vidrio con volumen de 20 ml.
2. El muestreo se realizó en la toma más cercana al efluente de bombeo.
3. Las muestras deben ser almacenadas en un lugar fresco hasta su preparación para evitar la desorción del Radón.
4. Las muestras no deben ser aciduladas, abiertas o agitadas.
5. La duración entre el muestreo y la extracción del Radón debe ser menor que la vida media del Radón (3.82 días).

Para la preparación de muestras el procedimiento recomendado por el fabricante del equipo, es mezclar 20 ml de un centellador líquido llamado Betaplate con los 20 ml de la muestra de agua en un embudo de separación. La mezcla se agita vigorosamente por un periodo de 5 minutos, esto con el fin de hacer la extracción del gas radón de la fase acuosa a la fase orgánica (centellador). Luego se separa la fase acuosa de la orgánica, esta última es colocada en un vial de vidrio, el cual es llevado a un lugar fresco y oscuro por un período de aproximadamente 3 horas para que el radón alcance el equilibrio secular con sus hijos.

3. Medición de muestras.

La lectura de las muestras se lleva a cabo por un periodo de 50 minutos en un detector de centelleo líquido llamado TRIATHLER portátil manufacturado por HIDEX Oy [28]. Este equipo tiene un sólo tubo fotomultiplicador y una electrónica digital para separar los pulsos alfa y beta, basándose en que las características espectrales de tales pulsos son distintos, por lo que el contador separa los pulsos de acuerdo a su amplitud y duración. Así un emisor alfa puede ser distinguido fácilmente de un emisor beta en el instrumento.

En el TRIATHLER la separación alfa/beta puede ser visualizado con un gráfico de dos dimensiones, donde el eje x representa la amplitud (canales) y el eje Y su duración. Debido a la mayor duración de los pulsos alfa, es que éstos tienen mayor coordenada Y que las betas, mientras que la amplitud (coordenada X) suele ser parecida. Así, con éste gráfico, se puede seleccionar la región ocupada sólo por los emisores alfas y/o betas manipulando el ancho de las ventanas y el parámetro de separación de pulsos (PLI). En las siguientes figuras, se muestra una fotografía del detector TRIATHLER y los gráficos que envía.

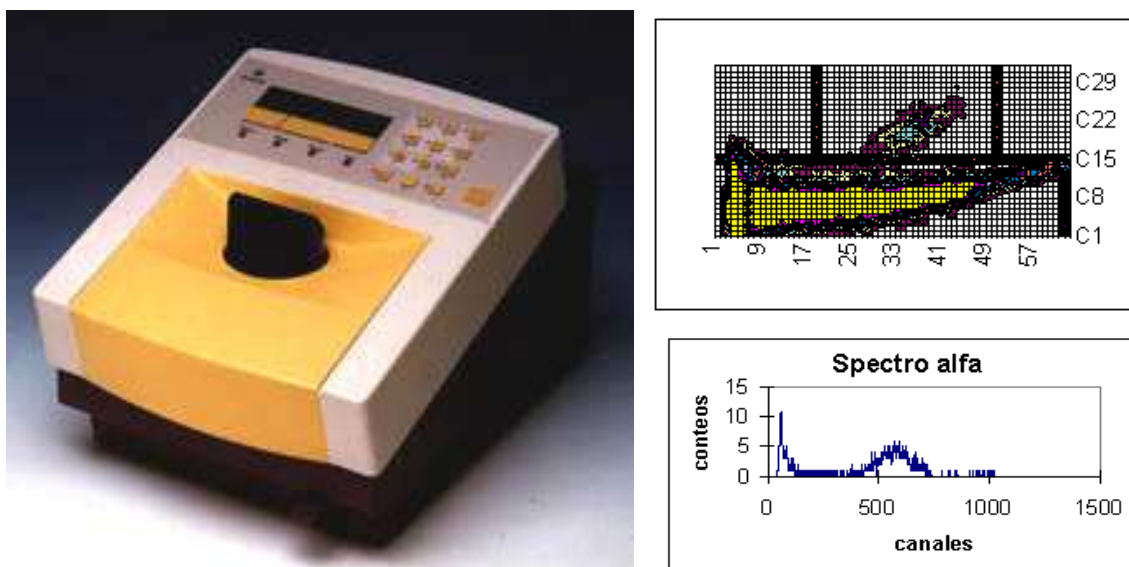


Figura M. Equipo TRIATHLER y espectros enviados por él

4. Cálculos.

Para determinar la eficiencia del equipo, se utilizó un estándar de ^{226}Ra preparado a las mismas condiciones que las muestras pero con una actividad conocida de $7.864 \pm 0.37\text{Bq}$. El ^{226}Ra , está en equilibrio con sus hijos, por lo que al existir 4 emisores alfa desde el ^{226}Ra al ^{210}Pb (Isótopo estable, ya que tiene una semivida de aproximadamente 10 años y no se pone en equilibrio en tan poco tiempo), entonces:

$$7.864 * 4 \text{ emisores alfa} = 31.45 \alpha/\text{seg} = 1887 \alpha/\text{min}$$

$$E = \frac{1295}{1887} = 0.68$$

El ^{222}Rn en equilibrio con sus hijos, tiene 3 desintegraciones alfas, por lo que;

$$A_{\text{Rn}} (\text{Bq/L}) = \frac{(\text{CPM}\alpha - \text{CPM}_{\text{Fondo}}) * 50}{3 * 60 * E} \quad (41)$$

Donde:

CPM= Velocidad de conteos alfa arrojados por el detector

50 = 1L equivale a 50 x 20ml (volumen vial)

3= Número de desintegraciones alfas a partir del ^{222}Rn

60 = conversión minutos-segundos.

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (42)$$

Donde:

$A(t)$ = Actividad presente al momento de efectuarse la extracción de ^{222}Rn .

A_0 = Actividad corregida mediante la expresión anterior referida a la Actividad de ^{222}Rn presente durante su muestreo.

La dosis anual efectiva HE originada por la inhalación de radón, proveniente de la concentración de radón en agua, se calcula mediante la siguiente expresión (UNSCEAR (B), 2000):

$$H_E = C_{Rn-w} R_{a-w} E_q T 9 \text{ nSv (Bq h m}^{-3}\text{)}^{-1} \quad (43)$$

Donde:

C_{Rn-W} = concentración promedio de radón (Bq m^{-3}).

R_{a-w} = es el radio de concentración aire-agua (10^{-4}).

E_q = factor de equilibrio entre el radón y sus progenitores en aire de interiores (0.4).

T = tiempo de exposición (horas, asumido como 7000 horas/año).

$9 \text{ nSv (Bq h m}^{-3}\text{)}^{-1}$ = factor de conversión de dosis.

IV. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ^{238}U POR EL MÉTODO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.

FENOMENO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.

Al irradiar una muestra con un haz de rayos X o γ se origina la emisión de los rayos X secundarios o fluorescentes. La radiación provocada está compuesta por fotones de energías características para cada elemento presente en dicha muestra. Dicha emisión de fotones se produce debido a que la radiación proveniente de la fuente de excitación, al tener una energía suficientemente alta, arranca electrones de las órbitas más internas dejando al átomo ionizado y excitado por el vacío generado en la órbita afectada; por lo que el átomo retornara a su estabilidad por sucesivas transiciones electrónicas desde estados de alta energía a estados de baja energía. La radiación secundaria es emitida, en cada transición electrónica, con una energía igual a la diferencia entre las energías de enlace de los electrones de su respectiva capa. Así la línea K (transición de la capa L a la K) tiene una energía igual a $E_L - E_K$, donde E_L y E_K son las energías de ionización de las orbitas L y K respectivamente. En general se observa dos líneas en la serie K, K_α y K_β , y de seis a diez líneas en la serie L [5].

El análisis por Fluorescencia de rayos X se basa en la generación y medición de los rayos X característicos para elementos de Número Atómico mayor a 11 en una gran variedad de materiales y en un rango de trabajo de 1.0 - 100.0 KeV.

A continuación algunas características principales de la técnica:

- Es un método analítico específico para la determinación de elementos, aplicable tanto a muestras sólidas como líquidas.
- Es principalmente una técnica no destructiva.
- Este método no depende de los enlaces químicos, estados de valencia y la composición isotópica de los elementos.
- Mide las líneas K y L de los elementos de número atómico mayor a 11.
- Los espectros de rayos X son esencialmente simples en estructura, mostrando pocas líneas por elemento. Las interferencias espectrales son raras.

- Analiza regiones de la muestra cercanas a la superficie por lo que las muestras analíticas deben ser completamente homogéneas en composición y deben tener una superficie lisa bien definida.
- Generalmente ésta proporcionalidad entre la intensidad de las líneas espectrales y la concentración del elemento (en el caso de intensidades de muestras de espesor delgado, el cálculo de la concentración es dependiente de la masa).

El análisis cualitativo de elementos se realiza mediante la identificación de la energía de los rayos X. Los valores tabulados, tan pronto como son mostrados en el espectro de rayos X, son tratados por comparación. Generalmente un ensayo cualitativo es realizado mediante la identificación de líneas principales; aunque para garantizar los resultados se deben garantizar algunas líneas características adicionales que muestran valores de intensidad con las correspondientes energías relacionadas a las líneas principales.

Uso del detector Hiperpuro de Germanio (HPGe). Se ha demostrado ampliamente, que los detectores de HPGe son apropiados para llevar a cabo la FRX. En este trabajo se usó como vía de excitación de los rayos X una fuente de ^{57}Co de 0.1 mCi de actividad. Fueron estudiadas dos geometrías muestra-fuente-detector, la primera de 90° y la segunda de 180° . En la figura N se muestra de forma esquemática la distribución de ambas geometrías:

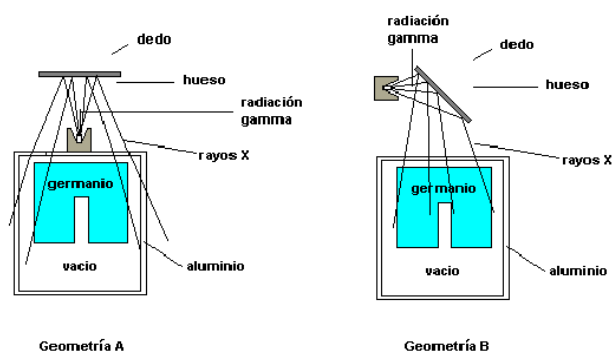


Figura N. Geometría A de 180° , y geometría B de 90° .

El factor más importante que se debe tener presente es que la energía de los rayos gamma emitidos por la fuente de excitación tiene que estar por encima del borde K de los rayos X de uranio, ubicada en los 115.6 keV. El segundo criterio está relacionado con el hecho de que la intensidad de los rayos X que provienen del uranio depende de la magnitud del fondo. Como la observación de tales picos depende del límite de detección que es de unos cuantos ppm de U, la ubicación de los picos depende fuertemente de la aparición de los bordes Compton y estos a su vez de la geometría empleada. En la Tabla 7 se muestran las ubicaciones de las energías de Compton de las líneas de 122.1 y 136.5 keV que emite la fuente de ^{57}Co .

Es evidente que para 90° el valor de la energía de Compton es muy alta, lo que interferirá en el valor del fondo de los picos de rayos X de uranio.

1. Preparación y medición de muestras.

Para comprobar los efectos que causa el fondo en los picos de rayos X del U, se diseñó un sistema experimental usando como muestra sendas láminas circulares de cartulina que contienen mineral de uranio presente en las rocas de Aldama, Chihuahua. Este suelo tiene alto contenido de U. Las muestras fueron preparadas con un rango entre 0.0017 g cm^{-2} y 0.0068 g cm^{-2} de espesor y la geometría usada es la de 180° .

El diámetro de las muestras es de 6 cm para lograr una mayor eficiencia en la detección de los rayos X. La fuente de ^{57}Co está blindada con plomo para evitar el tiro directo de los rayos gamma sobre el detector. Las muestras fueron medidas por un periodo de 6 horas cada una. En la figura O se muestra el esquema del diseño.

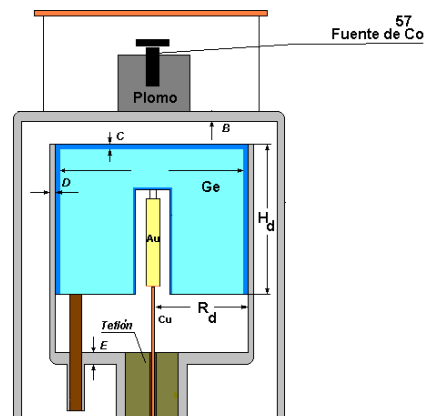


Figura O. Geometría muestra fuente-detector de 180°

Límites de detección: Usando el programa EGS4 se obtuvieron los espectros de rayos X para comprobar la correcta distribución del fondo Compton en la geometría de 180°, mediante el Método de simulación de Monte Carlo. Los resultados teóricos obtenidos mediante este método están de acuerdo con los resultados experimentales. Siguiendo la técnica explicada en el manual de operaciones del programa EGS4 [23], en la figura P se muestran la forma en que son divididas las zonas de interés para una mejor optimización de las técnicas de reducción de varianza.

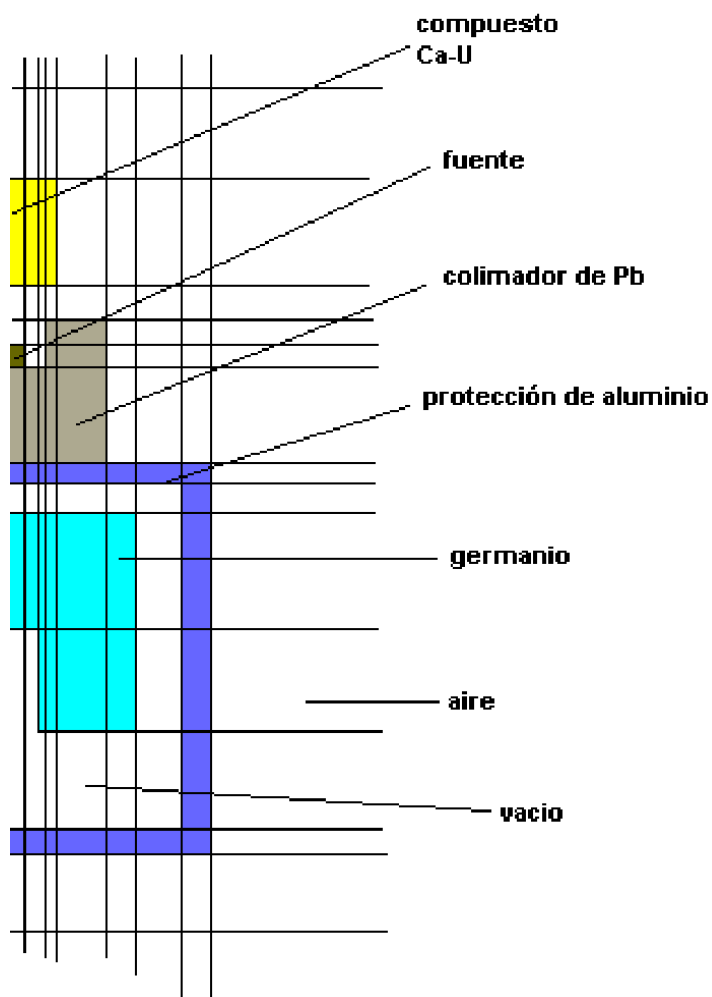


Figura P. Forma en que se distribuyen las zonas de la geometría muestra-fuente-detector para la geometría de 180° en el caso que se desee obtener el espectro por vía teórica haciendo uso del programa EGS4.

Por otra parte, en la figura Q se muestran estos resultados. Con los valores del fondo en la zona del Compton se pudo determinar, mediante el método de Currie [29] los valores de los límites de detección en cada una de las líneas de rayos X de interés.

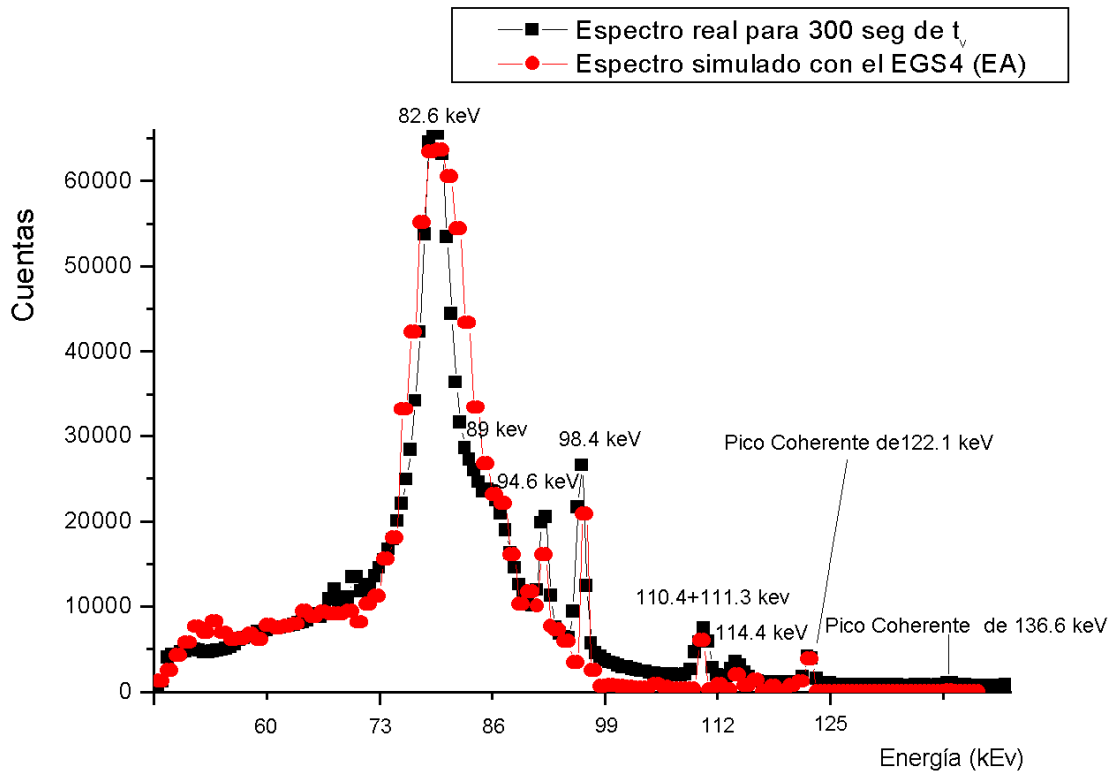


Figura Q. Superposición de los espectros reales y simulados mediante el método de Monte Carlo. Puede observarse como para la Geometría de 180° se obtienen mejores valores de fondo, ya que los bordes de Compton para las energías de 122.1 y 136.5 keV son respectivamente de 82.6 y 89 keV.

Las líneas escogidas de rayos X del uranio, excitado con la fuente de ^{57}Co , sus intensidades y los valores de eficiencia de cada pico de interés, para la determinación de la sensibilidad, son también simulados mediante el programa EGS4, para la geometría que se muestra en la figura O, son presentados en la Tabla 8.

2. Cálculos.

Para determinar la concentración de algún isótopo en una muestra usando un estándar, se utiliza:

$$C_{xi} = \frac{A_x}{N_{std}} \cdot \frac{M_{std}}{M_x} \cdot \frac{C_{std}}{t_{vx}} \quad (44)$$

Donde:

C_{xi} = concentración mediante la línea i.

N_{std} = velocidad de conteo de los rayos X del estándar.

A_{xi} = área neta de la muestra.

M_{std} = masa del estándar.

M_x = masa de la muestra.

C_{std} = concentración del estándar.

t_{rx} = tiempo de la medición.

RESULTADOS.

Resultados de radiactividad en suelo.

En la Tabla 9 se presentan las actividades específicas de las series del uranio y torio, así como la actividad del ^{40}K de las muestras analizadas. En la misma Tabla se presenta la rapidez de dosis absorbida producida en el aire a un metro de altura, obtenida de aplicar la ecuación (37). Los resultados del control de calidad de la espectrometría gamma, realizada de manera independiente para cuatro muestras en el CREN-UAZ, dan una diferencia del 5 % para las cuatro actividades determinadas. En la Figura R se muestran los resultados de las concentraciones de actividad en el suelo de la ciudad de Aldama, Chihuahua.

Tabla 9. Concentraciones de ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K en suelo, así como la dosis efectiva calculada.

	^{238}U	^{232}Th	^{40}K	H_E
Muestra	(Bq kg⁻¹)	(Bq kg⁻¹)	(Bq kg⁻¹)	(nSv h⁻¹)
F01	52.2 (0.3)	68.4 (0.5)	1071.5 (6.7)	88.5
F02	52.1 (0.3)	59.2 (0.5)	1082.1 (6.8)	84.1
F03	45.2 (0.3)	58.0 (0.5)	817.5 (6.3)	72.4
F04	52.0 (0.4)	62.1 (0.5)	1005.4 (6.8)	83.0
F05	67.2 (0.4)	77.0 (0.6)	1108.6 (6.9)	99.4
F06	100.2 (0.4)	55.5 (0.4)	1766.2 (6.6)	121.7
F07	460.5 (0.9)	56.6 (0.4)	1068.4 (5.4)	225.3
F08	50.5 (0.4)	62.7 (0.5)	1000.0 (6.8)	82.7
F09	53.1 (0.4)	63.0 (0.5)	1089.7 (7.0)	86.7
F10	52.4 (0.3)	62.4 (0.5)	1034.0 (6.0)	84.3
F11	44.6 (0.3)	58.7 (0.5)	932.3 (6.6)	76.3
F12	55.2 (0.4)	60.0 (0.5)	1017.1 (6.6)	83.5
F13	51.3 (0.2)	62.6 (0.3)	1032.5 (4.1)	84.0
F14	49.1 (0.4)	60.5 (0.5)	1011.6 (6.9)	81.4
F15	46.6 (0.4)	58.1 (0.5)	1059.1 (7.5)	80.9
F16	50.3 (0.3)	63.8 (0.4)	1025.2(5.0)	84.0
F17	48.8 (0.4)	57.2 (0.5)	1033.5 (7.3)	80.4
F18	53.2 (0.4)	64.6 (0.5)	936.3 (6.5)	82.5
F19	49.5 (0.3)	63.7 (0.5)	1048.0 (6.8)	84.4
F20	51.8 (0.3)	63.8 (0.4)	1044.4 (5.3)	85.1
F21	457.6 (0.8)	57.0 (0.4)	1058.0 (5.2)	224.1
F22	437.3 (0.8)	56.7 (0.4)	1006.7 (4.9)	215.2
F23	49.5 (0.4)	53.7 (0.5)	1022.3 (6.9)	78.4
F24	61.7 (0.4)	65.9 (0.5)	1023.4 (7.0)	89.0

F25	57.3 (0.4)	56.7 (0.5)	1106.3 (7.2)	85.5
F26	63.9 (0.4)	65.6 (0.5)	1005.7 (6.3)	89.0
F27	58.2 (0.4)	62.2 (0.5)	922.0 (6.5)	82.5
F28	171.8 (0.5)	66.2 (0.5)	955.9 (5.6)	125.4
F29	255.4 (0.5)	41.9 (0.3)	807.5 (4.0)	137.4
F30	436.5 (0.7)	63.4 (0.4)	968.8 (4.4)	217.1

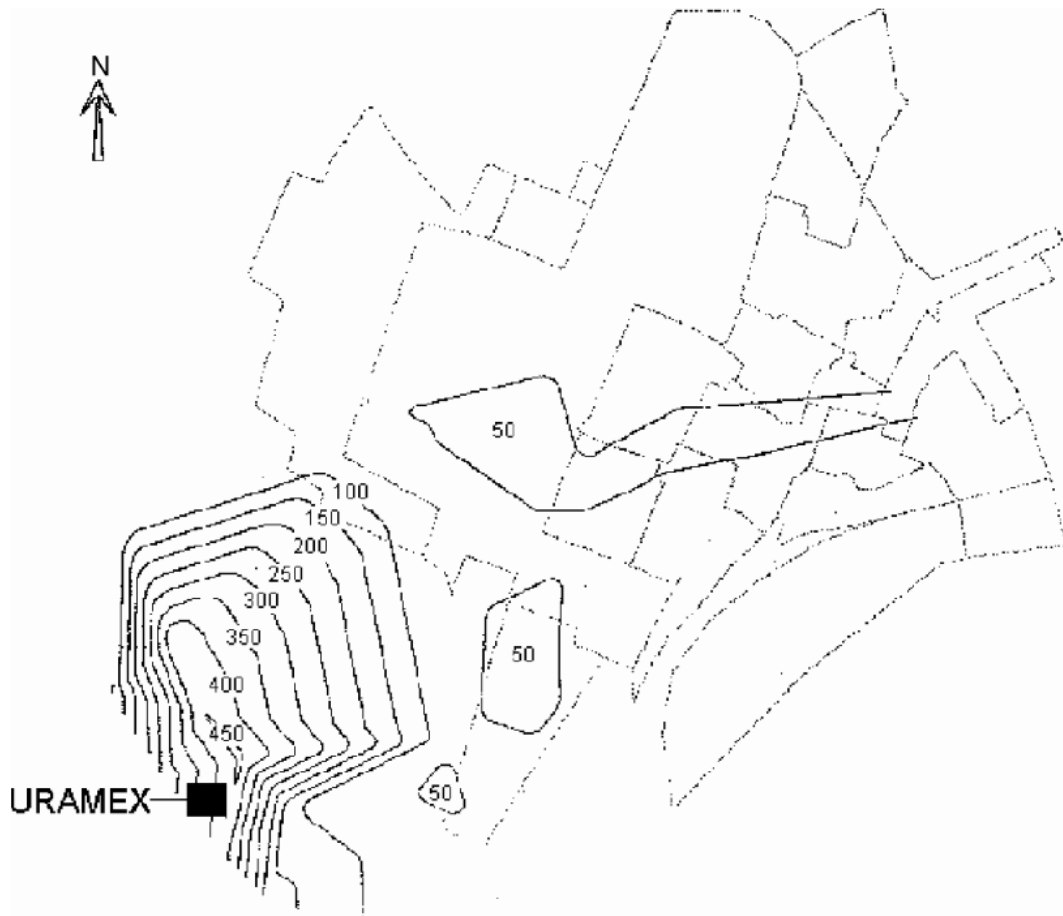


Figura R. Curvas de concentración de actividad de radioisótopos en suelo

Resultados de radón en interior de domicilios.

En la Tabla 10 se muestran los resultados del “tamizaje” de radón en aire de interiores, en domicilios de la ciudad de Aldama. Además, en la Tabla 11 se presentan los resultados de ^{222}Rn en un muestreo posterior (aleatorio), en la misma localidad.

Tabla 10. Concentración de actividad de ^{222}Rn en aire de interiores

Domicilio	A(BqL ⁻¹)	A(pCiL ⁻¹)
Lerdo 810	0.04	1.13
Jesús Acosta 6100	0.05	1.31
José Greco 348	0.05	1.33
rancho Los Leones	0.06	1.65
9a y Ojinaga 809	0.06	1.67
6a 802	0.07	1.80
A. Gameros 119	0.08	2.10
Zaragoza y 2a 201	0.09	2.53
Fco. Villa 2	0.10	2.59
A. Gameros 305	0.11	3.07
8a 1006	0.16	4.22
C. Morelos 405	0.18	4.75
Constitución 1403	0.19	5.19
Aranda Olivas	0.20	5.48
Lerdo 2200	0.20	5.52
C. Juárez y 2a.	0.21	5.67
6a y Cuahutemoc	0.22	5.88
C. Gutierrez 702	0.23	6.15
C. 18 y Trias1801	0.39	10.53

Total de muestras	19
Valor máximo (pCiL⁻¹)	10.53
Valor mínimo (pCiL⁻¹)	1.13
Promedio (pCiL⁻¹)	3.85
Límite (pCiL⁻¹)	4.00

Tabla 11. Concentración de actividad de ^{222}Rn en aire de interiores

Domicilio	A(Bq L ⁻¹)	A(pCiL ⁻¹)
Coronado 715	0.03	0.83

López 801	0.06	1.75
22 414	0.07	1.99
3a 403	0.07	2.03
Armando Gameros 102	0.08	2.18
20 de Noviembre	0.11	3.06
Júpiter 2204	0.11	3.11
7a 1600	0.12	3.48
Constitución 1805	0.18	4.22
2a 407	0.15	4.42
Mártires de Aldama 6	0.16	4.46
Rayón 1600	0.16	4.54
Ricardo Flores Magón 26	0.17	4.80
Pascual Orozco 2301	0.17	4.98
López 800	0.20	5.58
Oscar Ornelas 3622	0.21	5.61
De la Cruz 1107	0.20	5.67
Venustiano Carranza	0.20	5.69
25 y Donato Guerra	0.21	5.98
Donato Guerra 105	0.21	6.07
Rodolfo Fierro 18	0.22	6.40
Morelos 405	0.23	6.59
Insurgentes 1602	0.25	6.87
Morelos y 13 1102	0.24	6.90
24 3303	0.24	6.90
Plan de Ayala y 24	0.26	7.12
Ruben Jaramillo 35	0.28	7.97
Trias 504	0.30	8.01
Armando Gameros 335	0.29	8.39
Mirna Quiñonez	0.30	8.58
20 Nov. Y 20a 1804	0.31	8.90
Carmen Serdan 5	0.37	10.45
16 202	0.40	11.47
Coronado y 17	1.35	29.76

Total de muestras	34
Valor máximo (pCiL⁻¹)	29.76
Valor mínimo (pCiL⁻¹)	0.83
Promedio (pCiL⁻¹)	6.32
Límite (pCiL⁻¹)	4.00

Resultados de radón en agua.

En la Tabla 12 se muestran los resultados de radón en agua de toma domiciliar; muestras colectadas directamente del grifo. Asimismo, en la Tabla 13 se presentan los resultados de ^{222}Rn en agua muestreada de pozos en la misma ciudad.

Tabla 12. Concentración de ^{222}Rn en agua del grifo en casa habitación de la Ciudad de Aldama.

Domicilios	A₀ (Bq L⁻¹)	A(T) (Bq L⁻¹)	Error (+/-)
Roberto Sosa y Silvestre	3.65	4.3	0.22
Calle Lopez No. 800	4.73	5.7	0.26
Calle Jesús Acosta	6.66	8.1	0.30
Armando Gameros 102	8.1	10.2	0.34
Calle 2º	11.3	13.4	0.38
Roberto Sosa y Nogales	12	14.2	0.39
Roberto Sosa y Carmen Serdan	18.6	21.6	0.47
Casa Hogar Amin	19.9	23.9	0.51
Calle 3º No. 403	20.8	24.8	0.51
Rodolfo Fierro	19.8	24.9	0.53
Armando Gameros No. 335	20.9	25.8	0.53
Calle 16 No. 202	21.6	27.1	0.55
Martires de Aldama	21.3	27.2	0.56
Calle Septima	23.4	27.4	0.54
20 de Noviembre	23.9	29.8	0.58
Morelos y 13	25.6	31.3	0.59
Tanque que abastece la Ciudad	26.6	31.9	0.59
Gerardo Martinez	27	32.6	0.60
Morelos No. 405	26.5	32.8	0.60
Roberto Sosa	27.7	33	0.60
Calle Jesús Ojeda	27.3	33.2	0.60
De la cruz e insurgentes	27.2	33.5	0.61
Trias No. 504	28	34.9	0.63
Donato Guerra	29.6	35.7	0.62
Calle 22º No. 414	29.3	35.8	0.63
Leonardo Aguirre	34	40.7	0.67
Calle Lopez No. 801	34.3	41	0.67
Calle Jupiter No. 2204	34.7	42.1	0.68

Total de muestras	28
Valor máximo (Bq L⁻¹)	42.1
Valor mínimo (Bq L⁻¹)	4.3
Promedio (Bq L⁻¹)	25.8
Límite (Bq L⁻¹)	11.0

Tabla 13. Concentración de ²²²Rn en muestras de pozos.

Pozo	A ₀ (Bq L ⁻¹)	A(T) (BqL ⁻¹)	Error (+/-)
Pozo 3	26.7	27.3	0.5
Pozo 2	34.6	35.6	0.6
Pozo 1	38.9	39.8	0.6

Total de muestras	3
Valor máximo (Bq/L)	39.8
Valor mínimo (Bq/L)	27.3
Promedio (Bq/L)	34.23
Límite (Bq/L)	11.0

Resultados de la determinación de concentración de uranio mediante rayos X por espectrometría gamma.

Se calcularon los valores de concentración para los cinco picos de los rayos X del uranio en cinco muestras, como ya se mencionó anteriormente. A los resultados se les aplicó el programa estadístico BABXEL [30], para cada una de las líneas reportadas (94 keV, 98 keV, 110 keV, 111 keV y 114 keV). En la Tabla 14 se presentan los resultados de los contenidos de uranio obtenidos mediante la expresión (44) para cada muestra estudiada y preparada mediante suelos de yacimientos uraníferos de la zona de Peña Blanca en el Estado de Chihuahua. Estos resultados fueron obtenidos mediante el uso del U_3O_8 como estándar, lo que permitió realizar la correspondiente pre-certificación el los suelos de los yacimientos de Peña Blanca.

Tabla 14. Concentración de actividad del uranio (Bq kg⁻¹) en las muestras con mineral de uranio.

	v1	v2	v3	v4	v5	v6	Promedio
Uranio (94 keV)							
M1	3201(263)	3137(240)	2907(240)	3252(265)	3118(254)	3240(264)	3142.5(127.3)
M2	4795(399)	4682(379)	4584(379)	5181(427)	5252(433)	5330(447)	4970.7(321.3)
M3	3056(248)	3157(270)	3326(270)	2952(240)	2835(235)	3270(266)	3099.3(188.3)
M4	3944(320)	4152(309)	3833(309)	4185(338)	4056(327)	4301(346)	4078.5(170.4)
M5	2651(213)	2490(212)	2631(212)	2616(211)	2600(209)	2543(204)	2588.5(60.6)
Uranio (98 keV)							
M1	2741(140)	2743(140)	2748(140)	2889(147)	2905(148)	2921(148)	2824.5(88.8)
M2	5054(259)	5076(241)	4732(241)	4722(242)	4746(243)	4952(254)	4880.3(166.5)
M3	3190(162)	3028(153)	3023(153)	3225(163)	2712(137)	3149(167)	3055(187.7)
M4	3995(201)	4030(207)	4117(207)	4043(204)	4060(204)	4077(205)	4050.7(41.74)
M5	2519(127)	2521(125)	2490(125)	2436(122)	2514(126)	2538(128)	2503.5(36.1)
Uranio (110 keV)							
M1	2775(145)	2648(155)	2983(155)	2929(153)	2873(149)	2917(151)	2887.5(72.3)
M2	5070(266)	5247(255)	4822(255)	5089(267)	4884(260)	5089(271)	5030.5(155)
M3	3115(160)	3334(164)	3200(164)	3115(160)	3009(155)	3166(166)	3156.5(108.3)
M4	4284(218)	4204(214)	4208(214)	4232(215)	4373(222)	4218(214)	4250.2(65.5)
M5	2571(130)	2621(133)	2633(133)	2618(133)	2830(133)	2638(134)	2618.5(24.4)
Uranio (111 keV)							
M1	2742(143)	2813(153)	2946(153)	2893(151)	2839(147)	2882(150)	2852.5(71)
M2	5008(263)	5190(252)	4763(252)	5027(264)	4825(257)	5026(267)	4973.2(155)
M3	3078(158)	3293(162)	3161(162)	3077(158)	2972(153)	3137(161)	3119.7(107.2)
M4	4232(215)	4160(211)	4156(211)	4181(212)	4320(219)	4166(212)	4202.5(63.9)
M5	2539(129)	2589(132)	2601(132)	2586(131)	2598(132)	2606(132)	2586.5(24.4)

Uranio (114 keV)							
M1	2818(203)	2654(224)	3253(224)	3147(222)	3130(222)	3229(221)	3038.5(244.5)
M2	5275(381)	6111(367)	4927(367)	5583(412)	5066(374)	4698(353)	5276.7(508.2)
M3	3337(218)	3636(225)	3455(225)	3254(214)	2773(187)	3521(233)	3329.3(303.9)
M4	4331(273)	4186(266)	4204(266)	4431(278)	4263(268)	4327(272)	4290.3(91.5)
M5	2548(160)	2571(164)	2628(164)	2664(166)	2634(165)	2661(166)	2617.7(47.8)

Elemento	Promedio	D.S.
Uranio (94 keV)	3575.9	880.15
Uranio (98 keV)	3463.4	899.9
Uranio (110 keV)	3589.8	930.74
Uranio (111 keV)	3546.9	919.76
Uranio (114 keV)	3710.5	1010.1

DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Radiactividad en suelo.

Los valores determinados de actividades específicas para las series del Uranio y Torio, así como para el isótopo K-40, son muy altos para la ciudad de Aldama, en comparación con los resultados obtenidos en muestras tomadas en Parral y Jiménez, las cuales dan un promedio de aproximadamente 30 Bq/Kg para las series del uranio y torio (Moreno, 2003). Para Aldama el promedio para la serie del Uranio (en la zona poblada) es de 52.8 Bq Kg⁻¹, la serie del Torio da un promedio de 61 Bq Kg⁻¹, y para el K-40 el cual también es muy alto el valor, el promedio es de 1035 Bq Kg⁻¹. Los puntos muestreados más cercanos a la planta fueron el F7, F21, F22 y el F30, el promedio de la dosis efectiva para éstos es de 220.4 nSv h⁻¹. Para la gente que trabajará cerca de ésta zona por 40 hr a la semana, durante 50 semanas al año, recibiría una dosis anual efectiva de 0.44 mSv/año. En México se tiene establecido como valor máximo permitido para el público, que la dosis anual efectiva es de 5 mSv/año, podemos observar que en la zona antes mencionada es de 10 órdenes menores que el establecido. Para la zona poblada el promedio de la dosis efectiva es de 83.8 nSv h⁻¹, la cual da una dosis anual efectiva de 0.74 mSv/año (22 h al día, 40 semanas al año).

²²²Rn en aire de interiores.

En los muestreos realizados para las dos temporadas invernales, el promedio para el tamizaje fue de 141.3 Bq m³ y para el muestreo aleatorio 224.7 Bq m³, esta diferencia en los resultados puede deberse a las condiciones de construcción de los domicilios muestreados, así como a las diferencias en las condiciones climáticas para cada muestreo. Además, se observa que en el primer muestreo de la totalidad de domicilios el 47.4% muestra valores por arriba de los permitidos (límite de acción). Así mismo, en el muestreo aleatorio el 76.5% de los domicilios contienen concentraciones de ²²²Rn por arriba del límite de acción establecido por

la EPA. El muestreo aleatorio para la ciudad de Aldama es mayor que para las ciudades de Parral y Jiménez, en las cuales ya se realizó el muestreo, dando como resultados 200 Bq m³ y 118.7 Bq m³, respectivamente.

²²²Rn agua.

El resultado del muestreo en agua de pozo en la ciudad de Aldama para la determinación de radón, arrojó un promedio de 34.23 Bq L⁻¹ y para el agua en domicilios el promedio fue de 25.8 Bq L⁻¹. De la totalidad de los domicilios muestreados se encontró que el ²²²Rn en agua se encuentra por arriba del máximo permisible por la EPA en un 76% de las muestras colectadas. Además, el 100% de los pozos analizados se encuentra con concentraciones de este elemento superando el valor límite permisible. Era normal esperarse que el agua en domicilios diera un valor tan elevado, ya que el agua que se extrae de los pozos es distribuida inmediatamente hacia los domicilios sin pasar por ningún proceso de aireación. Por otra parte, el camino que recorre hasta llegar a cada uno es relativamente corto, ya que Aldama es una ciudad muy pequeña. En la ciudad de Jiménez, en la cual el agua también es distribuida directamente de los pozos el resultado promedio obtenido fue de 12.6 Bq L⁻¹, el cual es más bajo que el estudiado.

Uranio en material superficial de Peña Blanca.

El valor promedio de la concentración de uranio para la muestra de Peña Blanca fue de 0.324 ± 0.002 ppm, el material de Peña Blanca fue analizado también por espectrometría alfa el cual arrojó el resultado 0.27 ± 0.05 ppm. La muestra se envió al laboratorio de análisis químicos, para que se determinara la concentración de uranio por medio de ICP y Absorción Atómica dando como resultado y el resultado obtenido fue de 0.23 ± 0.002 ppm. El límite de detección para el uranio en el detector HPGe fue de 23 ppm, el cual es alto en comparación con otros

trabajos reportados en la literatura. Con los resultados obtenidos de las mediciones en el HPGe, se puede establecer que las concentraciones de uranio en las muestras medidas, usando solo los rayos X detectados, se comportan de manera normal, dentro de una gaussiana. Además, los errores estadísticos que presentaron las mediciones fueron cercanos al 2%.

Análisis descriptivo de incidencias de cáncer en la ciudad de Aldama, Chihuahua.

En estudios que se han realizado en Estados Unidos se ha determinado que la principal causa de contraer cáncer de pulmón es el tabaquismo, pero se ha estimado que aproximadamente el 10% de los casos se debe a la inhalación de radón. Se ha calculado que el riesgo de contraer cáncer aumenta un 14% en una persona viviendo 30 años en una casa con una cantidad de 4 pCi/L, para la Aldama el promedio de radón en aire fue de 6.32 pCi/L, con un 76.5 % de las casa muestreadas por encima del límite. En el anexo 1 y 2, se muestran las defunciones y casos existentes por los diferentes tipos de cáncer reportados por la Secretaría de Salud para la ciudad de Aldama, a partir del año de 1995 a los días, de los cuales podemos observar que 20 defunciones han sido por cáncer en pulmón y 10 por cáncer en estómago, se encuentra una tendencia mayor en hombres que en mujeres y en edades a partir de 60 años en adelante.

CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se obtuvo la determinación de radiactividad en suelo, concentraciones de ^{222}Rn en agua y aire de interiores, así como la concentración de uranio en suelo mediante fluorescencia de rayos X.

Como se ha discutido hasta el momento los valores reportados para la ciudad de Aldama, Chihuahua, han sido altos en comparación con los resultados obtenidos de los muestreos en otras partes del estado. Para las muestras de suelo cercanas a la antigua planta de URAMEX, es probable que esta contaminación superficial se haya generado durante el procesamiento del mineral de uranio en los años 80's. Se demuestra como a medida que se alejan las muestras tomadas de la planta es menor la contaminación y permanece constante el promedio de las muestras (dentro de la zona poblada), esto puede deberse a las características del suelo. Para radón en aire y en agua los valores obtenidos fueron altos, comparados con las normatividad establecida para cada matriz. Lo anterior se puede explicar del hecho de que se encuentra bajo la ciudad de Aldama el dique felsico de la Sierra La Gloria con rocas uraníferas, el cual contribuye con estos radioisótopos en agua y suelo.

Por otra parte, el material superficial de Peña Blanca por los valores reportados se puede establecer para ser utilizado como método de análisis para la determinación de este elemento.

Por todo lo antes mencionado, se puede concluir que la población de la ciudad de Aldama se encuentra expuesto a una alta concentración de elementos radiactivos naturales, lo que a largo plazo podría contribuir a un deterioro en la salud de dichos habitantes.

RECOMENDACIONES

1.- Es necesario realizar un estudio aleatorio más detallado, ya que el muestreo tomado fue de 2 muestras por AGEB (Área Geoestadística Básica), para poder contar con una mayor estadística y confiabilidad en los resultados se recomienda tomar mínimo 3 muestras por AGEB. El muestreo para radón en aire se debe realizar cada año para obtener niveles promedio en la ciudad. Para el radón en agua el muestreo se puede realizar en diferentes temporadas al año, para determinar su variabilidad a lo largo de éste.

2.- Se recomienda a la población tener por lo menos 3 horas al día abiertas las ventanas, para que haya mayor ventilación y no aumente la concentración de radón en aire de interiores, para disminuir los riesgos de posible cáncer.

3.- Para disminuir el radón en agua, es necesario tomar medidas en las cuales el agua tenga procesos de aireación y agitación, para favorecer la desorción de radón.

4.- Para la determinación de concentración de uranio por medio de espectrometría gamma los límites de detección se deben mejorar ya que son bastante altos, se recomienda una mejora en la geometría de irradiación y el uso de una fuente de mayor intensidad.

5.- Es necesario realizar un estudio más detallado para encontrar la relación de los niveles de exposición (tanto interna como externa) y los casos de cáncer en la ciudad, para determinar la probabilidad de ocurrencia.

165-00

Tabla 1. Dosis anual efectiva (mSv) debida a fuentes naturales de radiación [1]:

Fuente	Externa	Interna	Total
Rayos cósmicos	0.380		0.380
Radionúclidos terrestres:			
⁴⁰ K	0.130	0.170	0.300
Serie del ²³⁸ U			1.400
²³⁸ U	0.140		
²²² Rn		1.200	
²¹⁰ Pb		0.05	
Serie del ²³² Th	0.190	0.080	0.270
Total (redondeado)	0.840	1.500	2.350

Nota: la inhalación de ²²²Rn varía en cuatro órdenes, dependiendo del clima y de las edificaciones en que vive la población.

Tabla 2. Usos de algunos isótopos en la medicina.

Isótopo	Uso
⁶⁰ Co	Destrucción de tumores cancerosos
⁵⁵ Fe	Determinación de Fe en sangre
⁴⁵ Ca	Determinación de Ca en el cuerpo
³⁶ S	Determinación de S en el cuerpo
⁵⁹ Fe	Rapidez de formación de glóbulos rojos
³² P	Detección de cáncer en la piel
¹³¹ I	Detección de mal funcionamiento de la tiroides
²⁴ Na	Determinación de Na en células y en el cuerpo

Tabla 3. Factor de calidad (Q), en función a las cantidades reportadas por la ICRU-40 los valores aproximados aceptados

Partícula Ionizante	Q
---------------------	---

Fotones (Rayos X y γ)	1
Electrones con energías superiores a 30 KeV	1
Rayos beta del tritio	2
Neutrones	25
Protones o iones pesados	25
Partícula alfa	25

Tabla 4. Uso del suelo en el municipio de Aldama, Chihuahua.

Uso Del Suelo	Privada		Ejidal		Comunal		Total
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha
Riego Por Gravedad	1,285	0.2	7	0.0	0	0.0	1,292
Riego Por Bombeo	4,135	0.5	354	0.1	0	0.0	4,489
Frutales En Desarrollo	61	0.0	0	0.0	0	0.0	61
Frutales En Producción	5,013	0.7	0	0.0	20,256	97.7	25,269
Temporal	82,990	11.0	38,554	15.4	469	2.3	122,013
Pastal	638,804	84.8	211,789	84.5	6	0.0	850,599
Forestal	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0
Terrenos No Especificados	20,862	2.8	0	0.0	0	0.0	20,862
Urbano							587
Superficie No Identificada							30
Total	753,150	73.5	250,704	24.5	20,731	2.0	1,025,202

FUENTE: Secretaría de Desarrollo Urbano. Dirección de Catastro 1999.

Tabla 5. Evolución Demográfica en el municipio de Aldama, Chihuahua.

Población		
Año	Población	Tasa Media Anual

1980	15,667	1.61
1990	17,169	0.92
1995	19,998	3.10
1996	20,617	3.10

FUENTE: Censo de Población y Vivienda 1995 (INEGI) y XI Censo General de Población y Vivienda 1990

Tabla 6. Características de la vivienda en la ciudad de Aldama, Chihuahua..

Viviendas Particulares:	
Habitadas	4,721
Con Energía Eléctrica	4,281
Con Agua Entubada	4,448
Con Drenaje	3,941
Ocupantes En Viviendas Particulares	19,935
Total De Viviendas Habitadas	4,724
Prom. De Ocupantes Por Vivienda Particular	4.2

Tabla 7. Energía de los Compton esperadas para cada geometría.

Energía del fotón(keV)	Razón de bifurcación	σ_{PE} para el U ($\text{cm}^{-2}\text{g}^{-1}$)	Compton en KeV	
			90°	180°
122.1	0.86	4.01	98.5	82.6
136.5	0.11	3.02	107.7	89.0

Tabla 8. Energía de los rayos X del uranio, las probabilidades relativas de emisión y los valores de eficiencia del detector de acuerdo a la geometría de la figura M.

$E_x(\text{keV})$	Línea	Prob. de Emisión	Valor de eficiencia para la geometría de disco
94.654	$K_{\alpha 2}$	0.282	0.015798
98.434	$K_{\alpha 1}$	0.451	0.016735
110.421	$K_{\beta 3}$	0.057	0.017106
111.298	$K_{\beta 1}$	0.107	0.017208
114.445	$K_{\beta 2}$	0.042	0.017267

BIBLIOGRAFÍA

1. Curso de Protección Radiológica para Personal Ocupacionalmente Expuesto. Dra. Maria Elena Montero Cabrera. Investigador Titular B. CIMAV, 2002.
2. Descubrimiento de la Radiactividad. Livret des célébrations nationales 1997 édité par le Ministère de la Culture. Direction des archives de France. Mars 1998: Dossier de Presse 1998 du centenaire.
3. Organización Internacional de Energía Atómica. Isótopos de la vida cotidiana. Viena, Austria. 1991.
4. Environmental Radioactivity. From Natural, Industrial and military Sources. Merril Eisenbud and Thomas Gesell. Fourth Edition, 1997.
5. tesis peruano
6. Las radiaciones y el manejo de las radiaciones nucleares. Jorge Rickards Campbell y Ricardo Camaras Ross.
7. OIEA technical report measurement of radionúclides in food and the environmental. A. Guide Book, Viena, 1989.
8. Consejo de Seguridad Nuclear CSN. Vigilancia Radiológica Ambiental en España.
9. IV Congreso Nacional de Seguridad y Medio Ambiente CONAESMA. Radiactividad Ambiental. Maria Elena Montero Cabrera.
10. Anuario Estadístico del Estado de Chihuahua. Edición 1998. INEGI Arq. Humberto Murillo Lozano. Heráldica municipal del Estado de Chihuahua. Censo de Población y Vivienda 1995.
11. Coordinación estatal de CATASTRO. Dirección General de Fomento Económico. Departamento de Planeación Industrial. Francisco R. Almada, Diccionario de Historia, Geografía y Biografía Chihuahuense, 1968.
12. Secretaría de Gobernación. Los municipios de Chihuahua SEECH, Dirección de planeación educativa. XI Censo General de Población de vivienda y conteo 1995. INEGI.

13. The Transfer of Uranium isotopes to the waters interacting with Carbonates from Mendip Hills, England. D. M. Bonotto, S.N. Andrews. PERGAMON 1999.
14. Seasonal Variations of ^{226}Ra y ^{222}Rn in mineral spring waters of aguas da Prata, Brazil. Joselene de Oliveira, Barbara Mazzilli, Comisión Nacional de Energía Nuclear. Sao Paulo, Brazil, 1997.
15. Determination of ^{222}Rn and ^{226}Ra in water using a large volume ionization Chamber. Isan Salih, Hakan Pattersson, Era Lund. ELSEVIER. Journal of environmental radioactivity, 1999.
16. Risk Assessment of Radón in Drinking water and indoor. Committee on Risk of Exposure to Radón in drinking Water, 1999.
17. Risk Assessment of Radon in drinking water. Committee on risk assessment of exposure to Radon in drinking water. National Academy Press Washington, d.c., 1999
18. Radionuclides in drinking water. Environmental Protection Agency. Maximum Contaminant level. 2000.
19. Documento de la Agencia de los Estados Unidos para la Protección Ambiental. El Radón: Guía para su protección y la de su familia, 1993.
20. Evaluación del Riesgo de efectos a la salud por inhalación de Radón en los estados Chihuahua y Zacatecas. Dra. María Elena Montero Cabrera, CIMAV,.
21. Curso de Detectores de la Radiación Ionizante. Dra. Maria Elena Montero Cabrera. Investigador Titular B. CIMAV, 2002
22. Re.Vi.Ra. Red de Vigilancia Radiológica para España. Manual de Procedimientos. FAMN Universidad de Sevilla, España.
23. Electrón-Gamma Shower Code Versión 4 (EGS4). A. F. Belajew, 1994. E. Mainegra y R. Capote, 1996.
24. Tesis SpectrumZoom.
25. Cohen, 1983; Cohen, 1986; George, 1990. A Diffusión Barrier Charcoal Adsorption Collector for Measuring Rn Concentrations in indoor air. Bernard L. Cohen and Richard Nason. University of Pittsburgh, 1985.

26. Zikovskiy L., Determination of adsorption coefficients of ^{222}Rn on activated charcoal by adsorption-desorption in a simple laboratory apparatus.
27. Radiotracer liquid scintillation analysis. Michael F. L'Annunziata, Michael J. Kessler. Academic Press 1997.
28. HIDEX, Personal life Science. Triathler multilabel tester. Institut National des sciences et techniques nucleaires. T.L. Mobius.
29. Revisiting-Currie-how low can you go? Christian Hergen, Simon Gerome and Mike Woods. Applied Radiation and Isotopes. 53 (2000) 45-50.
30. BABXEL.
31. http://conganas.tripod.com/radon_y_cancer.htm.
32. Sistema Epidemiológico de Defunciones. SSCH, Secretaria de Salud. SSA.
33. Secretaria de Salud. Dirección General de Epidemiología. Informe de casos nuevos de enfermedades.

A n e x o s

ANEXO 1
 DEFUNCIONES GENERALES DE LA ENTIDAD FEDERATIVA DE RESIDENCIA HABITUAL DEL FALLECIDO Y CAUSA, SEGÚN SEXO Y EDAD.
 Periodo: de Enero a Diciembre de 1995.

Descripción (causa)	sexo	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	75-79	80-84	85-más	Total
		años	años	años	años	años	años	años	años	años	
Tumor maligno del pulmón.	H	0	0	1	0	0	2	1	1	0	5
	M	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Tumor maligno de la mama.	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del útero.	M	0	1	1	0	1	0	0	0	0	3
Tumor maligno del estómago.	H	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Periodo: de Enero a Diciembre de 1996.

Descripción (causa)	sexo	45-49 años	50-54 años	55-59 años	60-64 años	65-69 años	70-74 años	75-79 años	80-84 años	85-más años	Total
Tumor maligno del pulmón.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Tumor maligno de la mama.	M	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Tumor maligno del útero.	M	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno del estómago.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

Periodo: de Enero a Diciembre de 1997.

Descripción (causa)	sexo	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	75-79	80-84	85-más	Total
		años	años	años	años	años	años	años	años	años	
Tumor maligno del pulmón.	H	0	0	0	0	1	1	1	1	0	4
	M	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Tumor maligno de la mama.	M	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2
Tumor maligno del útero.	M	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno del estómago.	H	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Periodo: de Enero a Diciembre de 1998.

Descripción (causa)	sexo	25-29 años	40-44 años	45-49 años	50-54 años	55-59 años	60-64 años	65-69 años	70-74 años	75-79 años	80-84 años	85-más años	Total
Tumores	H	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	7
(neoplasias)	M	0	1	0	1	1	1	0	2	1	0	0	7
Tumor maligno del estómago.	H	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	M	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno del colon.	H	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	M	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno del hígado.	H	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
	M	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno de la vesícula biliar.	H	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	M	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno del pulmón.	H	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2
	M	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno de la piel.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno del útero.	M	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Tumor maligno del endometrio.	M	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Tumor maligno de la próstata.	H	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
Tumor maligno del riñón.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Tumor maligno del encéfalo.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno de la mama.	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Descripción (causa)	sexo	25-29	40-44	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	75-79	80-84	85-más	Total
		años	años	años	años	años	años	años	años	años	años	años	
Tumor maligno del cerebro.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Tumores (neoplasias)	H	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2
	M	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	2	6
Tumor maligno del estómago.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno de la laringe.	H	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mieloma múltiple y tumores malignos de células plasmáticas.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2
Tumor maligno de la vesícula biliar.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del pulmón.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno de la piel.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del útero.	M	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno de la próstata.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del riñón.	H	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
	M	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2
Tumor maligno del encéfalo.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno de la mama.	M	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	10
Tumor maligno del	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

cerebro.	M	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Periodo: de Enero a Diciembre de 1999.

Descripción (causa)	sexo	25-29 años	40-44 años	45-49 años	50-54 años	55-59 años	60-64 años	65-69 años	70-74 años	75-79 años	80-84 años	85-más años	Total
Tumores (neoplasias)	H	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2
	M	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	2	6
Tumor maligno del estómago.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno de la laringe.	H	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mieloma múltiple y tumores malignos de células plasmáticas.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2
Tumor maligno de la vesícula biliar.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del pulmón.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno de la piel.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del útero.	M	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno de la próstata.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del riñón.	H	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
	M	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2
Tumor maligno del encéfalo.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Centro de Investigación en Materiales Avanzados.

Tumor maligno de la mama.	M	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno del cerebro.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Periodo: de Enero a Diciembre de 2000.

Descripción (causa)	sexo	25-29 años	40-44 años	45-49 años	50-54 años	55-59 años	60-64 años	65-69 años	70-74 años	75-79 años	80-84 años	85-más años	Total
Tumores (neoplasias)	H	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	2
	M	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno del estómago.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del pulmón.	H	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno de la piel.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del ovario.	M	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno de la próstata.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Periodo: de Enero a Diciembre de 2001.

Descripción (causa)	sexo	25-29 años	40-44 años	45-49 años	50-54 años	55-59 años	60-64 años	65-69 años	70-74 años	75-79 años	80-84 años	85-más años	Total
Tumores	H	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	4
(neoplasias)	M	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2
Tumor maligno del estómago.	H	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	M	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Tumor maligno del páncreas.	H	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del pulmón.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del hígado.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Tumor maligno del ovario.	M	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Tumor maligno de la próstata.	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Periodo: de Enero a Diciembre de 2002.

Descripción (causa)	sexo	25-29 años	40-44 años	45-49 años	50-54 años	55-59 años	60-64 años	65-69 años	70-74 años	75-79 años	80-84 años	85-más años	Total
Tumores	H	0	0	0	0	0	1	1	3	2	1	1	9
(neoplasias)	M	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	5
Tumor maligno	H	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
boca, labios y	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
faringe.													
Tumor maligno del	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
estómago.	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
colon.	M	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Tumor maligno del	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
hígado.	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Tumor maligno de	H	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
la laringe.	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del	H	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	3
pulmón.	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno de	H	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
la pleura.													
Tumor maligno del	M	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2
ovario.													
Tumor maligno de	H	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
la próstata.													
Tumor maligno del	H	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1

cerebro.	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumor maligno del	H	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
encéfalo.	M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tumores malignos	M	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
(primarios) de sitios														
múltiples														
independientes.														

ANEXO2
SECRETARIA DE SALUD
DIRECCIÓN GENERAL DE EPIDEMIOLOGÍA
INFORME DE CASOS NUEVOS DE ENFERMEDADES

Periodo: de Enero a Diciembre de 1998.

Descripción (causa)	15-24 años	25-44 años	45-64 años	65-más años	IMSS	ISSSTE	OTRAS	Total
Tumor maligno del pulmón.	0	0	0	0	-	-	-	0
Tumor maligno de la mama.	0	0	0	0	-	-	-	0
Tumor maligno cervicouterino.	0	2	2	1	1	-	4	5
Tumor maligno del estómago.	0	0	0	0	-	-	-	0

Periodo: de Enero a Diciembre de 1999.

Descripción (causa)	15-24 años	25-44 años	45-64 años	65-más años	SSA	IMSS	ISSSTE	OTRAS	Total
Tumor maligno del pulmón.	0	0	0	0	-	-	-	-	0
Tumor maligno de la mama.	0	0	0	0	-	-	-	-	0
Tumor maligno cervicouterino.	1	5	3	0	-	-	-	9	9
Tumor maligno del estómago.	0	0	0	0	-	-	-	-	0

Periodo: de Enero a Diciembre de 2000.

Descripción (causa)	15-24 años	25-44 años	45-64 años	65-más años	Total
Tumor maligno del pulmón.	0	0	0	1	1
Tumor maligno de la mama.	0	0	1	0	1
Tumor maligno cervicouterino.	0	0	0	0	0
Tumor maligno del estómago.	0	0	0	0	0

◆ Para el año 2001 no se encontraron datos reportados.

Periodo: de Enero a Diciembre de 2002.

Descripción (causa)	15-24 años	25-44 años	45-64 años	65-más años	Total
Tumor maligno del pulmón.	0	0	1	0	1
Tumor maligno de la mama.	0	0	0	0	0
Tumor maligno cervicouterino.	1	1	0	0	2
Tumor maligno del estómago.	0	0	0	0	0