

Determinación de las concentraciones de ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K en diferentes regiones de Colombia usando espectroscopía gamma de alta resolución

Wilmar Rodríguez, Fernando Cristancho

Departamento de Física - Universidad Nacional de Colombia, Bogotá
Centro Internacional de Física, Bogotá-Colombia

Resumen

Teniendo en cuenta la gran variedad de estructuras geológicas en Colombia, se tomo una colección de muestras de regiones costeras, y de algunos sistemas montañosos. Se determinaron las concentraciones de ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K usando un sistema de espectroscopía gamma de alta resolución. Dichas concentraciones permiten obtener un valor para la dosis recibida por la población que se encuentra en cada región estudiada.

Los resultados muestran una variación de estas concentraciones con la ubicación de la región estudiada. Se encontró que en particular regiones en el departamento de Santander tienen un alto contenido de ^{232}Th y ^{40}K . Se encuentra que todos los valores de dosis producidos por las concentraciones de ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K están por debajo del límite considerado peligroso para la salud humana.

Finalmente se comparo los resultados con otros estudios hechos en regiones con similares condiciones geológicas.

Índice

1. Introducción	2
2. Los radionúclidos ^{238}U, ^{232}Th y ^{40}K	2
2.1. Cadenas de decaimiento radioactivo	3
2.1.1. El proceso de decaimiento	3
2.2. Pérdida de Radón	6
3. Cantidades calculadas	6
4. Descripción del experimento	7
4.1. Resolución del detector	7
4.2. Montaje experimental	8
4.3. Regiones estudiadas y preparación de las muestras	8
4.3.1. Materiales de referencia	9
4.4. Proceso de medición	10

5. Resultados y Análisis	11
5.1. Espectros obtenidos	11
5.2. Cálculo de las concentraciones y dosis	12
5.2.1. Concentraciones	12
5.2.2. Actividad específica	14
5.2.3. Tasa de dosis absorbida en aire	15
5.3. Análisis	16
5.3.1. Comparación de los resultados producidos al usar las geometrías A y B	16
5.4. Resultados	18

1. Introducción

Los seres humanos están expuestos a radiación debida diferentes tipos de fuentes que podemos clasificar en 5 grupos:

Ingestión: Se refiere a elementos radioactivos que son ingeridos por un ser humano. Un ejemplo de esto es el consumo de bananos, un alimento con alto contenido de potasio (una parte de este potasio será ^{40}K que es radioactivo, ver Tabla 2).

Médico: Incluye todo tipo de tratamientos médicos a los que puede ser sometida una persona hoy en día. Ejemplos de esto son todas las radiografías que hacen uso de rayos X para obtener una imagen.

Rayos cósmicos: Son partículas subatómicas originadas en el espacio exterior. Este tipo de radiación esta siempre presente en el ambiente.

Rayos γ terrestres: Incluye la radiación proveniente del planeta mismo. Esta radiación es debida a los radionúclidos presentes en la corteza terrestre, en materiales de construcción y en el aire.

Inhalación: Es debida principalmente a la presencia del gas radón presente en la cadena de decaimientos del elemento radioactivo ^{238}U que se tratará adelante.

La Tabla 1 basada en los datos reportados en Ref. [1] muestra cómo cada una de estas fuentes contribuye a la radiación total recibida por una persona. Los valores reportados en la Tabla 1 representan un promedio mundial y algunos de ellos varían dependiendo del lugar, por ejemplo los rayos cósmicos son más intensos a mayores alturas y las concentraciones de elementos radioactivos presentes en la corteza terrestre son mucho más altas en unos lugares que en otros.

Ingestión	Médico	Rayos cósmicos	Terrestre	Inhalación
11 %	14 %	14 %	18 %	43 %

Tabla 1: Distribución de la radiación promedio que recibe una persona [1].

2. Los radionúclidos ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K

El origen más importante de los rayos γ terrestres son los radionúclidos naturales ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K . Su concentración depende de complejos procesos de mineralización y formación geológica. Su contribución

relativa a la dosis total que recibe una persona varía ampliamente de un lugar a otro y dicho valor de dosis no está sujeto al valor reportado en la Tabla 1; por esta razón es importante medir sus concentraciones ya que esto además permite controlar los niveles de dosis recibidos por la población en la región geográfica implicada.

Los elementos radioactivos ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K tienen un tiempo de vida media tan largo como del orden de Giga-años (ver Tabla 2). Estos elementos han estado presentes desde la formación de la tierra y continúan emitiendo radiación. El tiempo de semivida y la abundancia isotópica de estos elementos se muestra en la Tabla 2. La corteza terrestre está compuesta de diferentes elementos. La concentración promedio en porcentaje de los elementos uranio, torio y potasio en la corteza terrestre se muestra en la Tabla 2.

Radionuclido	Abundancia en la corteza terrestre %	Abundancia isotópica %	Tiempo de Semivida (Giga-años)
^{232}Th	0.0012	100	14
^{238}U	0.0004	99.3	4
^{235}U	0.0004	0.7	1
^{40}K	2.58	0.01	1

Tabla 2: Principales radionúclidos presentes en la corteza terrestre.

El ^{235}U tiene una abundancia isotópica muy baja comparada con el correspondiente valor para ^{238}U , por lo que la radiación emitida en una muestra con uranio será principalmente debida a la presencia de ^{238}U . Sin embargo el valor para la abundancia isotópica reportado en la Tabla 2 representa un promedio y esta cantidad puede variar de una muestra a otra.

El ^{40}K a pesar de tener una abundancia isotópica baja, tiene también un valor alto de abundancia en la corteza terrestre, con respecto a los demás elementos de la Tabla 2, y su contribución a la radiación llega a ser comparable con la radiación producida por ^{232}Th y ^{238}U . El ^{40}K decae en ^{40}Ar emitiendo un rayo γ de 1461 keV de energía, como muestra la Figura 1.

Los radionúclidos ^{238}U y ^{232}Th decaen de distintas formas (la mayoría de ellos por decaimiento α y otros por decaimiento β) en una serie de elementos que son también radioactivos. El proceso continúa hasta que el producto del decaimiento resulte ser un elemento estable, dicho proceso se denomina cadena de decaimiento.

2.1. Cadenas de decaimiento radioactivo

Las cadenas de decaimiento de los elementos ^{238}U y ^{232}Th se muestran en la Figura 1. En algunas de las etapas del decaimiento los radionúclidos emiten radiación γ . En la Figura 1 estos elementos se muestran en azul, dichos rayos γ permiten determinar las concentraciones de los elementos radioactivos usando espectroscopía γ .

2.1.1. El proceso de decaimiento

El decaimiento de un núcleo puede ser descrito por la ley:

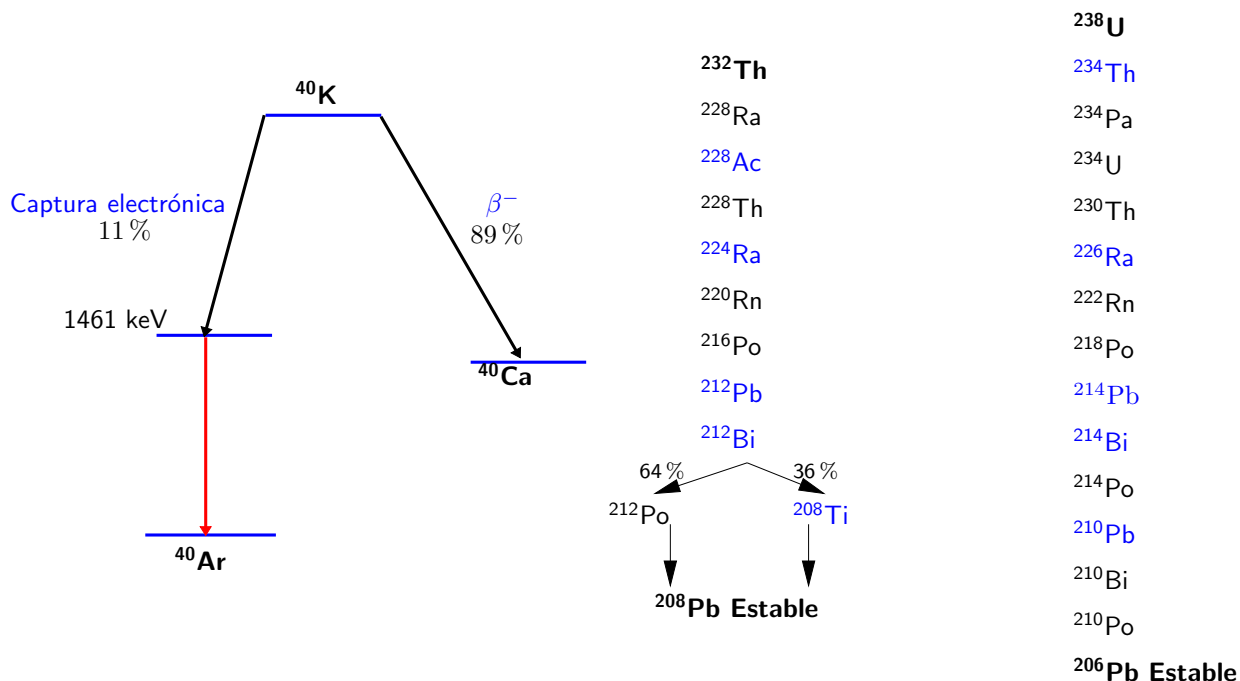


Figura 1: Esquema de decaimientos de los elementos ⁴⁰K, ²³²Th, y ²³⁸U.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N. \tag{1}$$

En esta ecuación N representa el número de núcleos y $1/\lambda = \tau$ representa el tiempo de vida media. En el caso de una cadena de decaimientos como las que son generadas por los elementos ²³⁸U y ²³²Th, las ecuaciones que describen el decaimiento de los respectivos núcleos en la cadena son:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \tag{2}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \tag{3}$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \tag{4}$$

⋮

$$\frac{dN_{n-1}}{dt} = \lambda_{n-2} N_{n-2} - \lambda_{n-1} N_{n-1} \tag{5}$$

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1}. \tag{6}$$

Los subíndices se refieren a cada núcleo de la cadena. La solución para cada núcleo depende de la solución de la ecuación inmediatamente anterior. La solución para los dos primeros elementos de la cadena permite

calcular el cociente de las actividades del núcleo padre (nombre que se asigna al primer elemento de la cadena) y el primer núcleo hijo, esto da como resultado

$$\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} [1 - \exp[-(\lambda_2 - \lambda_1)t]]. \quad (7)$$

Dependiendo los valores de λ_1 y λ_2 se pueden distinguir los tres casos que se muestran en la Figura 2. Para el caso $\tau_1 \gg \tau_2$, cuando ha transcurrido cierto tiempo, la actividad del hijo tiende a ser igual a la actividad del padre y se dice que se ha alcanzado el equilibrio secular. Si este es el caso se puede considerar $\lambda_1 N_1 \approx \lambda_2 N_2$ y la ecuación (3) cumple que $\frac{dN_2}{dt} = 0$, $N_2 = \text{constante}$; con lo que la solución para el tercer núcleo resulta fácil de calcular. Hallando esta solución se puede obtener una expresión para el cociente de las actividades del núcleo 2 y el núcleo 3. Esto es

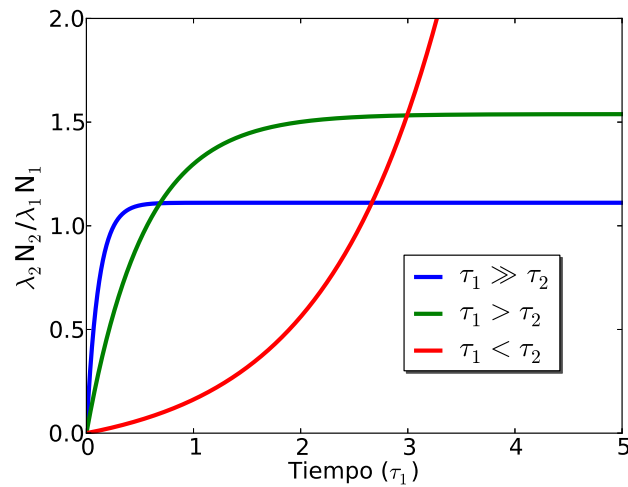


Figura 2: Cociente de las actividades del núcleo padre y su primer hijo.

$$\frac{\lambda_3 N_3}{\lambda_2 N_2} = 1 - \exp(-\lambda_3 t), \quad (8)$$

el resultado expresado en la ecuación (8) muestra que la actividad del núcleo 3 tiende a igualar la actividad del núcleo 2, sin importar el tiempo de vida media del núcleo 3. Este último sólo afectará el tiempo que tarda en alcanzarse el equilibrio pero dicho equilibrio podrá siempre ser alcanzado. Si se supone que ha pasado un tiempo suficiente para que se pueda considerar $\lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3$ y $N_3(t) \approx \text{constante}$, entonces la solución para $\lambda_4 N_4(t) / \lambda_3 N_3$ será idéntica a la ecuación (8).

Ahora ya se puede generalizar el resultado a toda la cadena ya que la solución para $N_n(t)$ depende solo de la solución para $N_{n-1}(t)$ con lo que las demás soluciones serán iguales. Se obtiene que

$$\frac{\lambda_i N_i}{\lambda_{i-1} N_{i-1}} = 1 - \exp(-\lambda_i t) \quad \text{para } i = 3, 4, 5, \dots, n - 1. \quad (9)$$

Las ecuaciones (7) y (9) basadas en la hipótesis de que $\tau_1 \gg \tau_2$ y que además fueron halladas bajo la suposición de que ha pasado un tiempo suficientemente largo para considerar iguales las actividades en cada etapa de la cadena, muestran que toda la cadena estará en equilibrio, lo que significa que la actividad del padre será igual a la actividad de cada uno de sus hijos. Este importante hecho permite obtener la actividad del núcleo padre midiendo la actividad de cualquiera de sus núcleos hijos.

En las cadenas ^{238}U y ^{232}Th la vida media de su primer hijo es mucho mas pequeña que la de sus respectivos padres. Estos tiempos son

$$\tau(^{232}\text{Th}) = 2.03 \cdot 10^{10} \text{ años} \gg \tau(^{228}\text{Ra}) = 8.29 \text{ años}, \quad (10)$$

$$\tau(^{238}\text{U}) = 6.45 \cdot 10^9 \text{ años} \gg \tau(^{234}\text{Th}) = 0.07 \text{ años}. \quad (11)$$

Los radionúclidos ^{238}U y ^{232}Th han estado presentes desde la formación de la tierra y por esto el equilibrio en cada etapa de la cadena está garantizado, a menos que alguno de sus elementos se pierda, como puede ser el caso del radón que es uno de los elementos que hacen parte de la cadena de ^{238}U .

2.2. Pérdida de Radón

Como se ve en la Figura 1 el radón esta presente en las cadenas de ^{238}U y ^{232}Th . El radón es un gas y por esta razón si una muestra es sometida a procesos como secado o macerado, este gas puede escapar y en ese caso el equilibrio de la cadena se perderá, es decir la actividad de los elementos que se encuentran por debajo del Rn en la Figura 1 en las cadenas de ^{238}U y ^{232}Th ya no será igual a la actividad de sus respectivos padres. Sin embargo el equilibrio de los elementos previos al radón seguirá manteniendose. Para reestablecer el equilibrio en el resto de la cadena es necesario empacar la muestra de tal forma que el gas no pueda escaparse y esperar un tiempo hasta que el equilibrio se alcance de nuevo. Dicho tiempo se puede calcular usando la ecuación (9). Si por ejemplo se empaca la muestra 30 días después de haberse perdido todo el radón, el cociente entre las actividades del ^{226}Ra , que es el núcleo producido inmediatamente despues del radón en la cadena del ^{238}U , y la actividad del ^{222}Rn tendrá un valor de 0.996. La Figura 3 muestra el comportamiento del cociente de las actividades de estos dos núcleos.

El ^{220}Rn tiene un tiempo de semivida de 55.8 segundos y este elemento está presente en la cadena del ^{232}Th . Por esta razón el equilibrio debido a la perdida de radón en dicha cadena se reestablecerá mucho más rápido que en el caso de la cadena del ^{238}U .

3. Cantidades calculadas

Para cuantificar la cantidad de radiación a la que están expuestos los seres humanos y para comparar con otros estudios realizados se calcularon tres cantidades:

Concentración elemental: La concentración elemental de un elemento radioactivo en una muestra, C_m , está definida como

$$C_m = \frac{m_r}{m_m}, \quad (12)$$

donde m_r es la masa del elemento radioactivo y m_m es la masa de la muestra. Este valor da una medida de la cantidad de un elemento radioactivo presente en la muestra. En este trabajo se presenta en partes

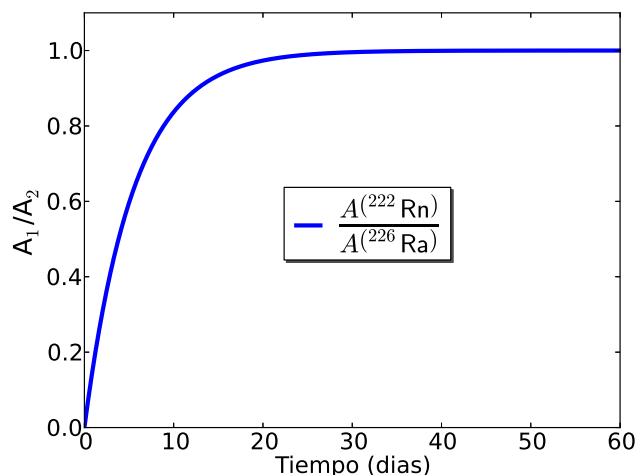


Figura 3: Cociente de las actividades del ^{222}Rn y ^{226}Ra .

por millón (ppm). Para determinar la concentración de cierto elemento radioactivo en una muestra es necesario tener un material de referencia con una cantidad conocida del elemento del que se quiere hallar su concentración.

Actividad específica: Es la actividad, A , (número de decaimientos por unidad de tiempo) por unidad de masa de la muestra. En este trabajo se calcularon en Bq/Kg.

Tasa de dosis absorbida en aire: Es la energía total absorbida por unidad de masa de aire que se encuentra a 1 m sobre el suelo.

4. Descripción del experimento

4.1. Resolución del detector

Para el proceso de medición se hace uso de un detector HPGe (Germanio hiperpuro) un detector de alta resolución en energía comparado con otros detectores de radiación que suelen usarse para realizar este tipo de medidas. La figura 4 muestra el FWHM como función de la energía, de los fotopicos generados por los detectores de radiación NaI(2X2), NaI(3X3), (donde los números hacen referencia al diámetro y la altura del cristal, que tiene forma cilíndrica. Estos valores están en pulgadas) BGO (que se refiere a un cristal compuesto de $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) y Germanio como función de la energía.

En un espectro de radiación natural se detectan varias energías con valores cercanos, generando problemas de interferencia. De la Figura 4 se observa que el detector de germanio produce los fotopicos con menor FWHM teniendo así la mayor resolución en energía. Esto permite reducir gran parte de interferencia que se presenta al medir radiación natural.

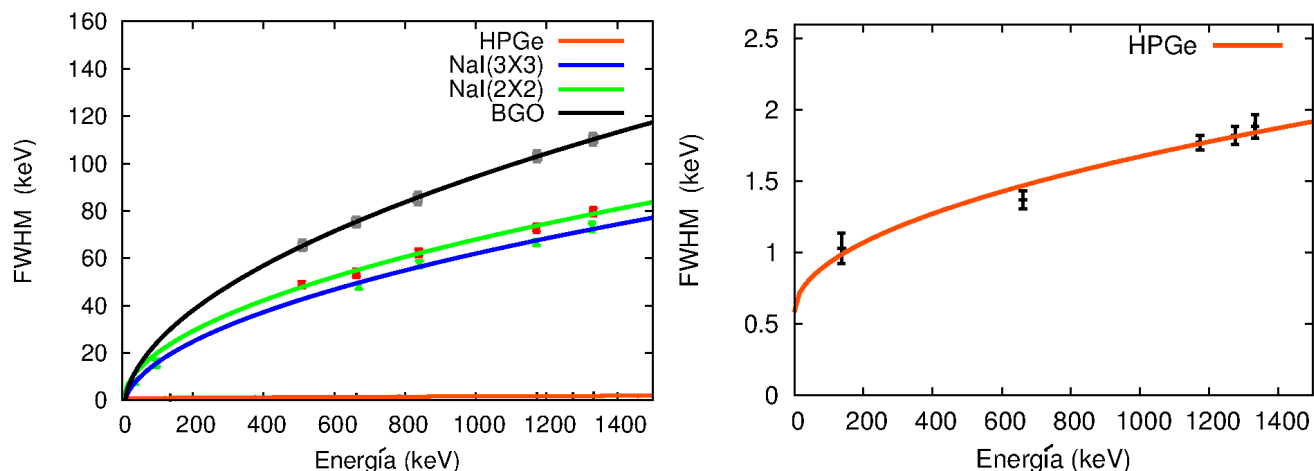


Figura 4: FWHM como función de la energía para distintos detectores.

4.2. Montaje experimental

Como se mencionó en la introducción, en el ambiente hay radiación debida a diferentes tipos de fuentes. Por esta razón antes de medir la radiación proveniente de ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K en una muestra de suelo, es necesario blindar el detector de la radiación que no es de interés y mantener dentro de dicho blindaje la muestra que se quiere medir. En el montaje experimental utilizado se hizo uso de un blindaje de plomo, dentro del que se ubicó el detector de radiación, en este caso de HPGe, y cada muestra que se analizó. En este trabajo se usaron dos montajes con distinta geometría que se muestran en la Figura 5. En la geometría B la muestra se encuentra a mayor distancia del detector que en la geometría A. Además el detector se encuentra a una mayor altura, dentro del blindaje de plomo, en la geometría A que en la geometría B. Esta última geometría se usó debido a que el elevador que soporta el detector estaba diseñado sólo para que el detector alcanzara la altura mostrada en la geometría B. El posterior cambio para obtener el montaje A de la Figura 5 se hizo para producir más precisión en la medida que la generada al usar la geometría B. Este hecho se explicará mas adelante.

4.3. Regiones estudiadas y preparación de las muestras

Las regiones estudiadas se muestran en las Figuras 6 y 7. Se estudiaron muestras de una isla (San Andrés), una region costera (Santa Marta), algunos lugares ubicados en la región Caribe que poseen una altitud cercana al nivel del mar (Aguachica y Bosconia) y algunas regiones montañosas de baja altitud (Cúcuta, Honda) y de mayor altitud (Pamplona y Bogotá). Además se hizo un estudio más específico en regiones del Departamento de Santander. De allí se tomaron muestras en los municipios de La Lizama, Girón, Zapatoca y Socorro, además de dos muestras que se tomaron la primera en el km 19 de la vía que conecta el municipio de Zapatoca con el municipio de San Vicente de Chucurí y la segunda a medio camino de la vía que conecta el municipio de Zapatoca con la vereda la Guayana. La ubicación de estos lugares se muestra en la Figura 7.

De cada region se recolectó una muestra de 500 g. Las muestras fueron secadas a 105°C durante 24 horas. Posterior a esto se pulverizó y se coló cada muestra de tal forma que tuviera granos de máximo 1.5 mm

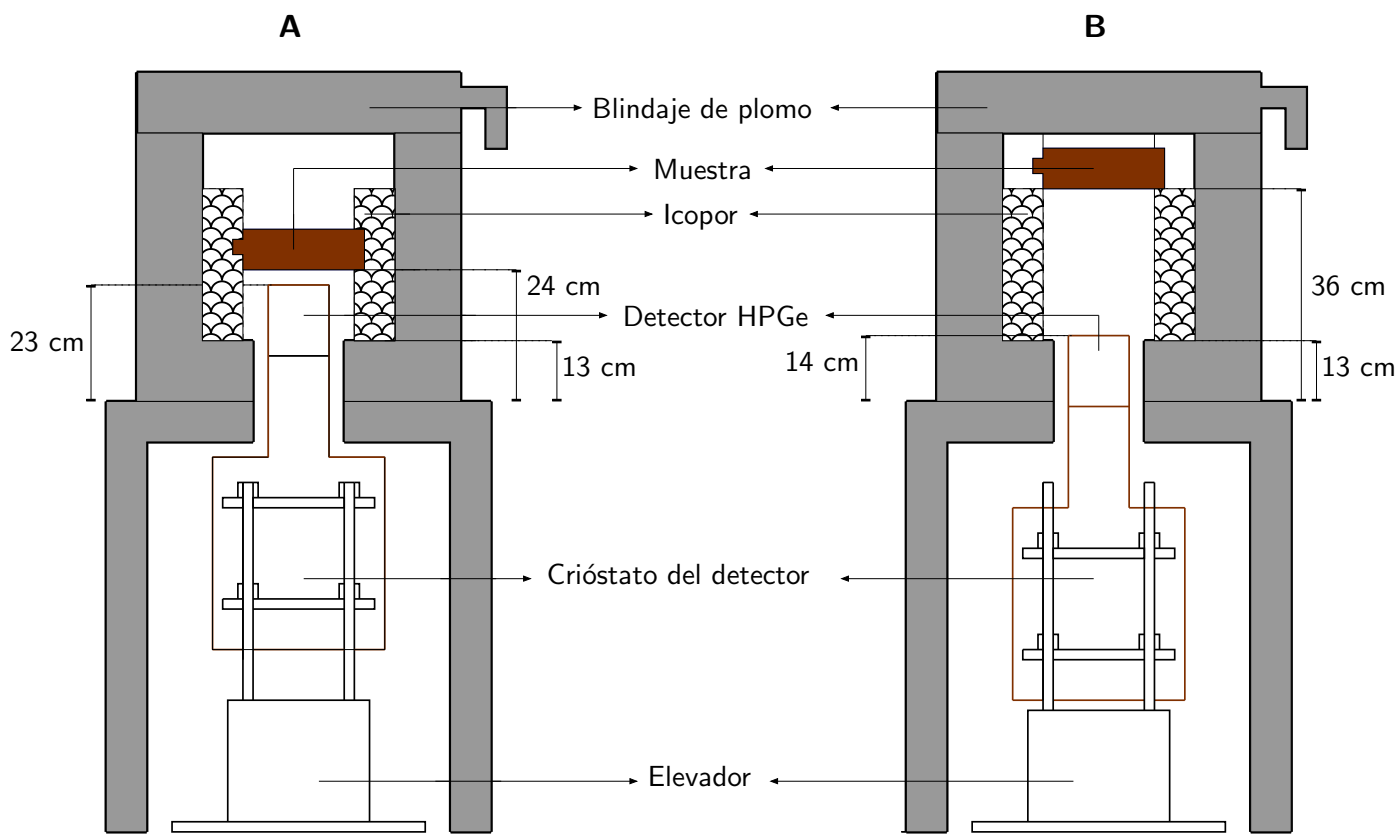


Figura 5: Esquema del montaje experimental usado.

de diámetro. Esto con el fin de comparar cada muestra con los materiales de referencia.

4.3.1. Materiales de referencia

Los materiales de referencia fueron preparados por el IAEA [2] de tal forma que existe uno por cada elemento (U, T y K). Dichos materiales consisten en una matriz de sílice (que contiene bajas concentraciones de U, T y K) dentro de la que se mezcla un mineral con alta concentración de uranio, torio o potasio según sea el caso. El resultado de la mezcla es una muestra de 500 g que se empaqueta en una botella de polietileno por cada material de referencia. Cada material de referencia posee unas características y por esto son etiquetados con un nombre. Los materiales usados en este trabajo son nombrados por el IAEA [2] como RGKU-1, RGKTh-1 y RGK-1 para uranio, torio y potasio respectivamente. Las concentraciones de los elementos U, T y K en cada uno de estos materiales de referencia se muestran en la Tabla 3. Obsérvese que en la Tabla 3 no se dan las concentraciones de los isótopos radioactivos ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K . Para determinar las concentraciones de estos isótopos se multiplicaron los valores en la Tabla 3 por la abundancia isotópica reportada en la Tabla 2.

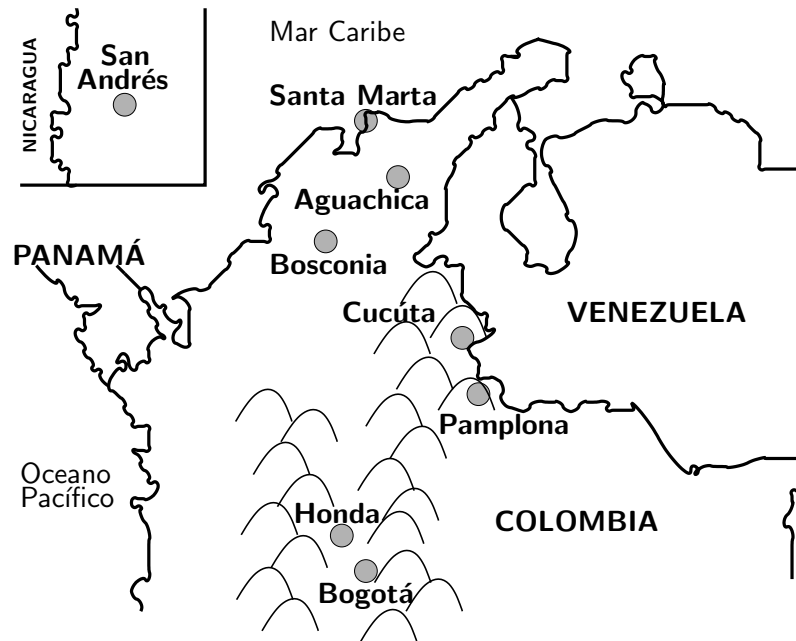


Figura 6: Lugares de los que fueron tomadas las muestras.



Figura 7: Lugares de los que fueron tomadas las muestras.

4.4. Proceso de medición

Las muestras que se estudiaron fueron empacadas en recipientes de la misma forma y volumen que los materiales de referencia. Todas las mediciones de actividad fueron realizadas con un detector HPGe y con las muestras y materiales de referencia dentro del blindaje de plomo (Canberra Modelo 747). Para las

	RGU-1	RGTh-1	RGK-1
Componente			
Uranio	400(2)	800(16)	< 0.001
Torio	< 1	6.3(4)	< 0.01
Potasio	< 20	200(100)	448000(3000)

Tabla 3: Concentraciones de uranio torio y potasio, en partes por millón, en cada uno de los materiales de referencia.

regiones que se muestran en la Figura 6 se usó el montaje experimental B mostrado en la Figura 5 y para las muestras tomadas en el Departamento de Santander se usó el montaje A mostrado en la Figura 5. La adquisición de datos fue de 24 horas para las muestras tomadas en el Departamento de Santander y de 36 horas para las demás muestras. Se hicieron medidas de radiación de fondo por 12 horas antes y después de medir cada muestra. Los materiales de referencia fueron medidos por 3 horas.

5. Resultados y Análisis

5.1. Espectros obtenidos

Los espectros resultados de las medidas son como se muestran en la Figura 8, en cuya parte izquierda se muestran algunos fotopicos y las correspondientes cadenas de deaciminto de las que son producidos. El gráfico de la parte derecha muestra el fotopico producido en el deaciminto del ^{40}K . Todos los espectros que se mostrarán de aquí en adelante fueron normalizados, es decir, el número de cuentas fue dividido por la cantidad de horas que duró la medición de cada muestra, fondo o material de referencia.

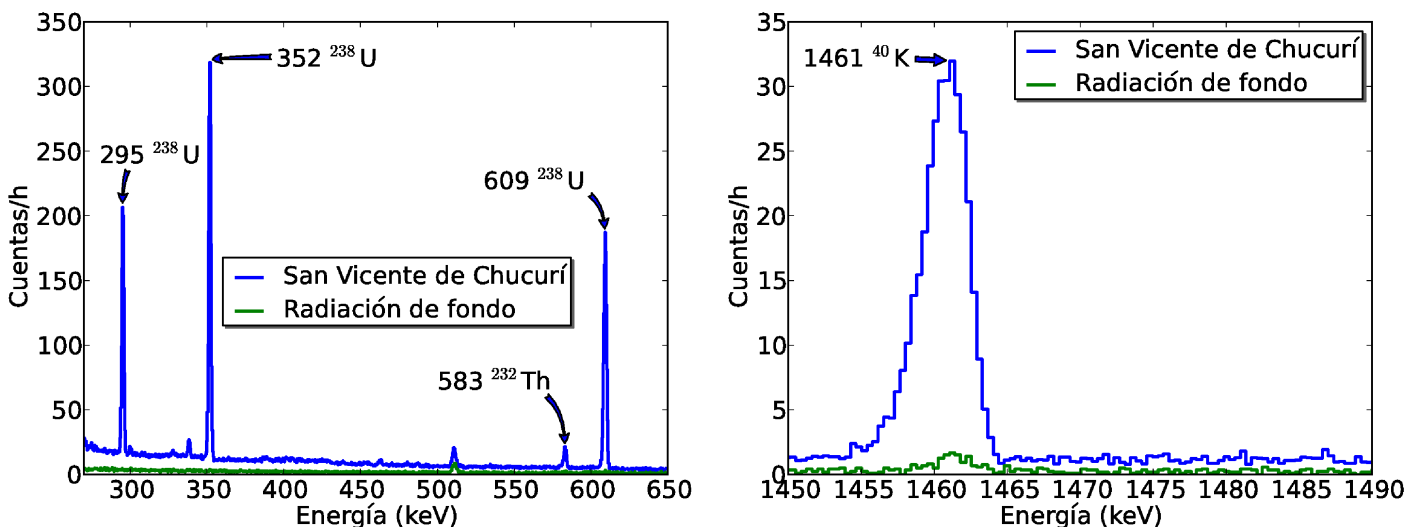


Figura 8: Espectro para la muestra de Pamplona

Para determinar las concentraciones de los elementos ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K a partir de los espectros obtenidos usamos el hecho de que cada núcleo en la cadena de ^{238}U o de ^{232}Th tiene la misma actividad que su

padre y con esto podemos usar cualquiera de las energías emitidas en cada cadena para nuestro propósito. El primer paso es identificar las energías de los fotopicos en el espectro con las energías emitidas por los elementos en cada cadena o elemento del que se quiere determinar su concentración. Haciendo esto tenemos alrededor de 10 fotopicos para determinar las concentraciones de cada cadena. Sin embargo debido a la gran cantidad de energías emitidas por cada cadena y a la presencia de otros rayos gamma en el ambiente, muchos de los fotopicos que podrían ser usados para el análisis presentan interferencia como la que se muestra en la Figura 9.

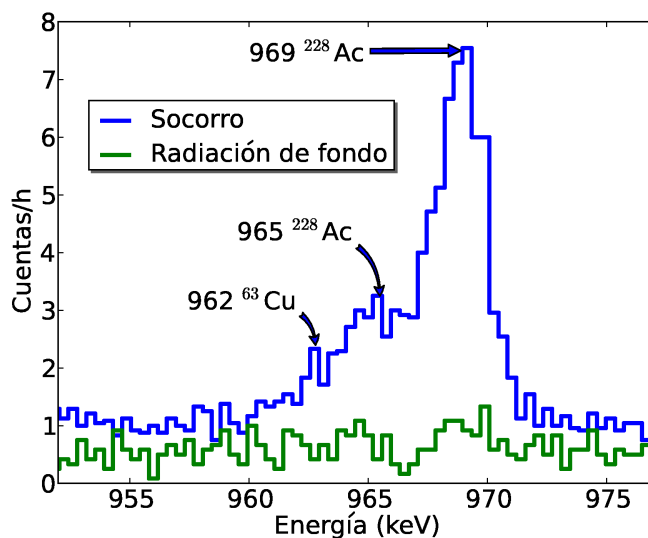


Figura 9: Interferencia que se presenta en algunos fotopicos en el espectro.

Sin embargo existen unos pocos fotopicos libres de interferencia y son estos los que se usarón en el análisis. El único rayo γ emitido en el decaimiento del ^{40}K presenta una pequeña interferencia con la energía de 1460 keV emitida en el decaimiento del ^{228}Ac presente en la cadena de ^{232}Th . En este caso se hizo una corrección en el análisis.

5.2. Cálculo de las concentraciones y dosis

La obtención de las cantidades deseadas a partir de los espectros normalizados requiere de ciertas consideraciones que se muestran a continuación:

5.2.1. Concentraciones

Para calcular las concentraciones, primero se resta el espectro de radiación de fondo a los espectros que se obtienen al medir cada muestra y materiales de referencia. De esta forma se obtiene un espectro, al cual llamaremos resultado, y que se muestra en la Figura 10 en un rango de energías que permite visualizar la diferencia entre los tres espectros que allí se muestran.

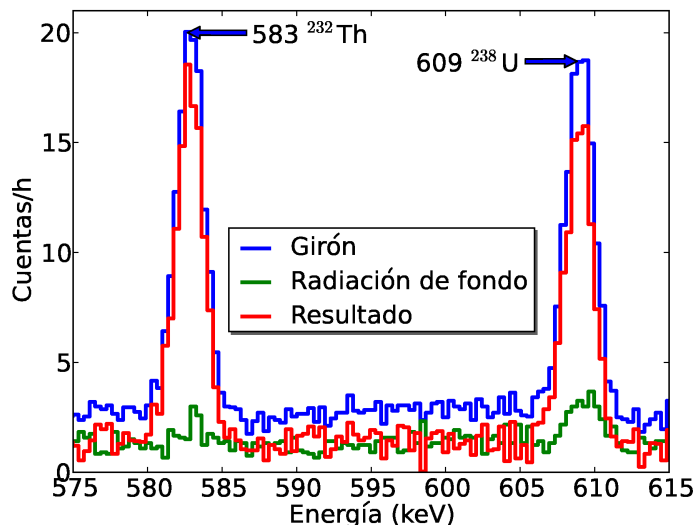


Figura 10: Espectro que resulta de la resta del espectro de radiación de fondo al espectro producido al medir la muestra de Girón.

Vale la pena comentar que algunos de los rayos γ que interactúan con el detector harán efecto compton en su interior y este efecto será mas evidente en el espectro de la muestra que en el de radiación de fondo. Por esta razón al restar los dos espectros los fotopicos en el espectro resultado aún no tienen su línea base en 0 Cuentas/h, este efecto se puede ver en la Figura 10.

Con este espectro resultado el siguiente paso es ajustar cada fotopico libre de interferencia por una función que resulta de la superposición de una gaussiana y un ajuste para la línea base de la gaussiana que como ya se explicó no se encuentra en 0 Cuentas/h. Seguido a esto se usa el hecho de que la concentración del elemento radioactivo en el material de referencia, C_R , es proporcional a las integrales de las gaussianas en el espectro de medición. Si I_{Ri} es la integral del fotopico i -ésimo en el material de referencia e I_{mi} es la integral del fotopico correspondiente en el espectro de la muestra. Entonces la concentración del elemento radioactivo en la muestra, C_m , se calcula con la ecuación,

$$C_m = \frac{C_R I_{mi} \epsilon b_\gamma}{I_{Ri} \epsilon b_\gamma}, \quad (13)$$

ϵ representa la eficiencia total del detector, (es decir el producto de la eficiencia geométrica con la eficiencia intrínseca del detector) b_γ representa la probabilidad de decaimiento por emisión gamma del núcleo que emite en la energía analizada i . Para poder calcular C_m se comparan los fotopicos correspondientes a las mismas energías en el material de referencia y en la muestra. De esta forma el término b_γ y la contribución a ϵ de la eficiencia intrínseca del detector se anulan, además como se usa la misma geometría en cada medición la eficiencia geométrica también se anula. De esta forma las concentraciones pueden ser halladas usando la ecuación

$$C_m = \frac{C_R I_{mi}}{I_{Ri}}. \quad (14)$$

5.2.2. Actividad específica

El eje y de la Figura 10 está normalizado a cuentas por hora. Y así la integral de cada fotopico es el número de decaimientos por emisión γ que fueron registrados por efecto fotoeléctrico en el detector dividido por el tiempo que duró la medida. Si dividimos este número por la eficiencia total del sistema de medición y por la probabilidad de decaimiento por emisión γ del núcleo de interés. Tenemos que el número de decaimientos por unidad de tiempo de cada elemento radioactivo se puede calcular con la expresión

$$\frac{I_{mi}}{\epsilon_i b_{\gamma i}}. \quad (15)$$

El subíndice i indica cualquier energía emitida por ^{238}U , ^{232}Th ó ^{40}K . De esta forma la actividad específica de cada elemento radioactivo en el material de referencia, A_R , y en la muestra, A_m , se calculan a partir de las expresiones

$$A_R = \frac{1}{m_R} \frac{I_{Ri}}{\epsilon_i b_{\gamma i}} \quad \text{y} \quad (16)$$

$$A_m = \frac{1}{m_m} \frac{I_{mi}}{\epsilon_i b_{\gamma i}}, \quad (17)$$

en donde m_R y m_m representan la masa del material de referencia y de la muestra respectivamente. Hasta ahora no podemos calcular la actividad específica porque no se conoce aún el valor de $\epsilon_i b_{\gamma i}$. Haciendo uso de la ley de decaimiento exponencial $A = \lambda N$. La actividad específica del elemento radioactivo en el material de referencia se puede expresar como

$$A_R = \lambda N \frac{1}{m_R} \quad \text{con} \quad N = \frac{N_A m_r}{m_a}. \quad (18)$$

En la ecuación (18) m_r representa la masa del elemento radioactivo y m_a su masa atómica, N_A es el número de Avogadro. m_r se puede expresar en términos de la concentración en el material de referencia, esto es,

$$m_r = C_R m_R. \quad (19)$$

Si hacemos uso de las ecuaciones (16), (18) y (19) tenemos dos formas de expresar A_R ,

$$A_R = \frac{\lambda N_A C_R m_R}{m_R m_a} = \frac{I_{Ri}}{m_R \epsilon_i b_{\gamma i}}, \quad (20)$$

y de la ecuación (20) podemos obtener una expresión para $\epsilon_i b_{\gamma i}$ en términos de cantidades conocidas o medidas,

$$\frac{1}{\epsilon_i b_{\gamma i}} = \frac{m_R \lambda N_A C_R}{m_a I_{Ri}}, \quad (21)$$

lo que nos permite obtener una expresión para la actividad específica del elemento radioactivo en la muestra,

$$A_m = \frac{I_{Mi} C_R m_R \lambda N_A}{I_{Ri} m_a m_m}. \quad (22)$$

Haciendo uso de la ecuación (14) podemos expresar este resultado en términos de la concentración del elemento radioactivo en la muestra, esto es,

$$A_m = \frac{C_m C_R m_R \lambda N_A}{C_R m_a m_m} = C_m \frac{m_R \lambda N_A}{m_m m_a}. \quad (23)$$

Los materiales de referencia contienen concentraciones conocidas de de Uranio, Torio y Potasio. Dichas concentraciones se muestran en la Tabla 3. En este trabajo se quieren determinar las concentraciones de los isótopos radioactivos ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K por esta razón la expresión (23) se debe multiplicar por la abundancia isotópica, f , del elemento radioactivo según sea el caso, estos valores se reportan en la Tabla 2. De esta forma la expresión que se usó para calcular la actividad específica de cada elemento radioactivo es

$$A_m = C_m \frac{m_R \lambda N_A f}{m_m m_a}. \quad (24)$$

Obsérvese que la actividad específica, A_m , es proporcional a la concentración, C_m . Para las muestras de Bogotá, Cúcuta, Pamplona y San Andrés que tienen una masa, m_m , diferente a la masa del material de referencia, m_R , se usó la expresión (24) para el cálculo de la actividad específica. para las demás muestras analizadas que tienen la misma masa que la contenida en los materiales de referencia, $m_m = m_R$, se usó la expresión

$$A_m = C_m \frac{\lambda N_A f}{m_a}. \quad (25)$$

Note que nunca fue necesario conocer el valor de la eficiencia del detector ni de la eficiencia geométrica, ya que estos valores se cancelaron siempre o pudieron ser expresados en términos de cantidades conocidas.

5.2.3. Tasa de dosis absorbida en aire

Esta cantidad es calculada por la siguiente fórmula aceptada por el UNSCEAR [3] y por el ICRU [4] y tomada de [5]:

$$D(\text{nGy/h}) = 0.462 A_{\text{U}} + 0.604 A_{\text{Th}} + 0.0417 A_{\text{K}}. \quad (26)$$

Esta expresión es una suma de las actividades específicas, A , pesadas por un factor relacionado con la cantidad de energía absorbida por el aire y que es emitida por la respectiva cadena o elemento. Nótese que el factor de peso más bajo se encuentra multiplicando la actividad específica del potasio. Esto se debe

a que el ^{40}K emite sólo un rayo gamma mientras que las cadenas de ^{238}U y ^{232}Th emiten alrededor de 10 rayos gamma cada una.

La dosis anual efectiva puede ser obtenida de la tasa de dosis absorbida en aire convirtiendo esta cantidad de nGy/h a mSv/y y multiplicando por un factor de ocupación en exteriores de 0.2, propuesto por en [3], para representar el tiempo promedio que las personas gastan en espacios abiertos, esto es

$$D(\text{mSv/y}) = D(\text{nGy/h}) \times 8760 \text{ h} \times 0.2 \times 0.7 \text{ Sv/Gy} \times 10^{-6}. \quad (27)$$

5.3. Análisis

Para determinar las concentraciones de ^{238}U se escogieron dos energías, 352 keV, que se produce en el decaimiento del ^{214}Pb , y 609 keV producida por la emisión de un rayo gamma en el decaimiento del ^{214}Bi . Para el análisis de la cantidad de ^{232}Th en la muestra se escogieron también dos energías, 583 keV, emitida por el ^{208}Tl y 911 keV que es emitida por el ^{212}Pb . Estas cuatro energías están libres de interferencia en el espectro medido. Las concentraciones obtenidas a partir del análisis de cada uno de estos fotopicos se muestran en la Tabla 4 para la muestra de La Guayana.

Energía(keV)	Cadena Radioactiva	Núcleo	Concentración obtenida en ppm
352	^{238}U	^{214}Pb	4.7(1)
609	^{238}U	^{214}Pb	5.2(2)
583	^{232}Th	^{208}Tl	18.4(4)
911	^{232}Th	^{212}Pb	18.4(5)
1461	-	^{40}Ar	73.4(2)

Tabla 4: Concentraciones obtenidas haciendo el análisis con diferentes energías, para la muestra de La vereda La Guayana.

Obsérvese de la Tabla 4 que las concentraciones obtenidas con los diferentes fotopicos son muy similares. Esto era de esperarse ya que la cada cadena cumple las supocisiones necesarias para estar en equilibrio secular, y además los fotopicos analizados están libres de interferencia. Podemos calcular las concentraciones como un promedio de los dos valores obtenidos, en este caso las concentraciones de ^{238}U y ^{232}Th son

$$C_{\text{U}} = 4.9(3)\text{ppm}, \quad C_{\text{Th}} = 18.4(5)\text{ppm}.$$

De la misma forma se hizo el análisis para las demás muestras y se determinaron así todas las concentraciones.

5.3.1. Comparación de los resultados producidos al usar las geometrías A y B

Debido a que algunas muestras fueron medidas con el arreglo experimental A de la Figura 5 y otras con el B de la Figura 5, es necesario comprobar que los resultados obtenidos al medir una misma muestra

con las dos geometrías sean los mismos. Para esto se midió la muestra de Honda con cada geometría, lo que implica la medición de la radiación de fondo y de los materiales de referencia con las dos geometrías. Una región del espectro obtenido al medir con cada una de las geometrías se muestra en la Figura 11. Los espectros están todos normalizados, es decir que el número de cuentas fue dividido por el respectivo tiempo de medición de la muestra y radiación de fondo. De esta forma se pueden hacer comparaciones directas.

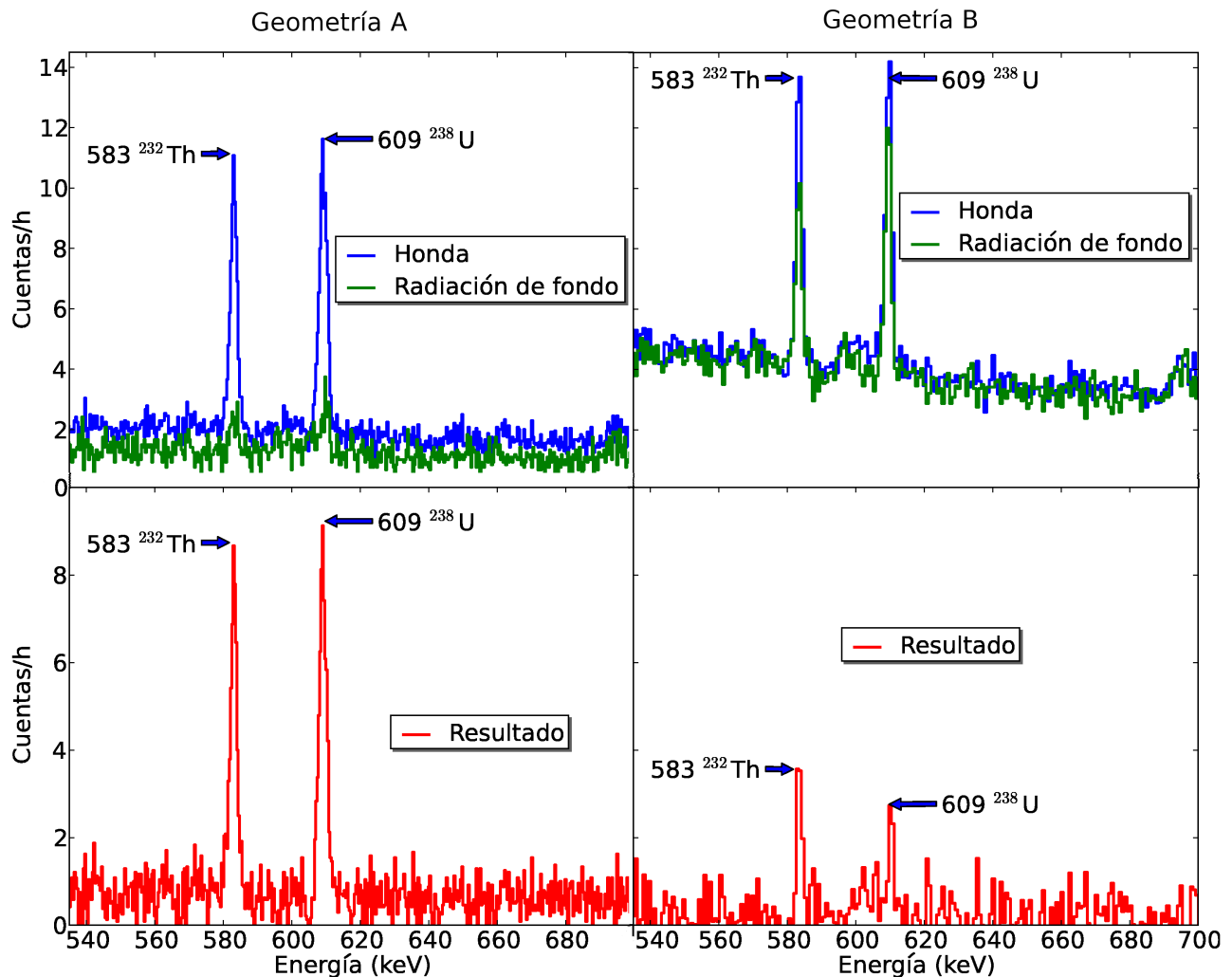


Figura 11: Comparación de los espectros producidos al medir la muestra de Honda con las geometrías A y B.

De la Figura 11 podemos observar diferencias entre los espectros de radiación de fondo obtenidos al usar cada geometría. El número de cuentas en el espectro de radiación de fondo obtenido al usar la geometría A es menor que cuando se usa la geometría B. Los fotopicos tienen menos cuentas, además, en para el rango de energías gráfico, en la región donde no hay fotopicos dichos espectros de radiación de fondo son casi constantes y tienen un valor de aproximadamente 2 cuentas por hora para el espectro medido con la geometría A, y de aproximadamente 4 cuentas por hora para el espectro medido con la geometría B. El espectro resultado que se muestra en rojo en la Figura 11 es muy diferente en cuanto al número

total de cuentas de cada fotopico allí mostrado.

Si calculamos las concentraciones de los elementos ^{232}Th , ^{238}U y ^{40}K con cada geometría se obtienen los valores mostrados en la Tabla 5.

	^{232}Th	^{238}U	^{40}K
<i>Geometría</i>			
A	7.0(3)	1.5(1)	20.0(7)
B	9(1)	1.5(4)	20(2)

Tabla 5: Concentraciones en ppm.

Los valores obtenidos al medir con la geometría A generan una incertidumbre mas baja que los valores obtenidos al usar la geometría B. Este hecho se debe en gran parte al menor número de cuentas que presenta el espectro de radiación de fondo, cuando se mide con la geometría A. Lo que genera una mayor estadística en el espectro resultado que corresponde a la geometría A de la Figura 11, y por tanto una menor incertidumbre en la medida. Los valores de las concentraciones de ^{238}U (1.56 ± 0.10) para la geometría A y (1.52 ± 0.39) para la geometría B son muy similares. Las concentraciones de ^{40}K (20.04 ± 0.70) para la geometría A y (20.09 ± 2.40) para la geometría B son también muy similares de hecho teniendo en cuenta la incertidumbre de la medición podemos decir que se obtuvieron los mismos resultados para las concentraciones de ^{238}U y ^{40}K usando las dos geometrías. Los valores para la concentración de torio fueron de (7.03 ± 0.30) para la geometría A y (9.97 ± 1.20) para la geometría B. La similitud en los valores obtenidos al usar cada una de las geometrías da consistencia a todas las mediciones realizadas, además de mostrar que el experimento produce resultados que son perfectamente reproducibles.

5.4. Resultados

La concentración de un elemento es adimensional como se puede ver de la ecuación (12). Las ecuaciones (24) y (25) muestran que la actividad específica es proporcional a la concentración, por esta razón la actividad específica da una medida de las concentraciones del elemento radioactivo en la muestra. En la mayoría de la literatura se habla de concentraciones en Bq/kg (Ver por ejemplo [3] y [6]). La Tabla 6 muestra los valores calculados de las actividades específicas, en Bq/kg, de cada muestra estudiada en este trabajo. Los valores más altos de concentraciones de ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K se encuentran en negrilla.

De las regiones estudiadas y los valores en la Tabla 6 se puede decir lo siguiente:

- *Regiones costeras:* De la Tabla 6 se puede ver que la isla de San Andrés presenta la concentración más baja de ^{238}U (< 2.4 Bq/kg) y la playa de Santa Marta presenta la concentración mas baja de ^{40}K (< 5.3 Bq/kg). Estos valores son más bajos que los de otras regiones costeras, como se muestra en la parte alta de la Tabla 6, además estos valores estan muy por debajo del promedio mundial.
- *Regiones no costeras:* Las demás regiones no costeras y que no se encuentran dentro del Departamento de Santander presentan valores de actividad específica del orden del promedio mundial, excepto por la muestra de Bogotá que presenta la más alta concentración de ^{232}Th (86 Bq/kg), del orden de tres veces el promedio mundial.

	^{232}Th	^{238}U	^{40}K
<i>Regiones costeras</i>			
San Andrés	23(2)	<2.4	94(8)
Santa Marta	43(5)	34(4)	<5.3
Nile Delta [7]	2-96	-	29-653
Costa Karnataka del Sur de India [8]	14-49	20-62	61-317
Islas Canarias [9]	12-110	7-104	142-1489
Kiaga, Costa del Sureste de India [10]	11-42	16-61	78-255
<i>Regiones no costeras</i>			
Pamplona	25(2)	26(1)	86(5)
Cúcuta	19(3)	22(1)	275(34)
Aguachica	21(7)	14(1)	368(29)
Honda	28(1)	19(1)	530(9)
Bosconia	25(3)	18(4)	936(46)
Bogotá	86(6)	52(4)	772(42)
<i>Regiones montañosas en el Departamento de Santander</i>			
La Lizama	61(5)	35(3)	384(33)
Girón	59(1)	39(1)	1332(6)
Zapatoca	52(1)	39(1)	1225(5)
San Vicente de Chucurí	53(1)	448(3)	1519(7)
La Guayana	74(1)	61(1)	1943(8)
Socorro	77(1)	56(1)	554(3)
Rocas en minas de India [6]	-	123(7) - 40858(174)	
Promedio mundial [3]	30	35	400

Tabla 6: Concentraciones en Bq/kg. Los valores que se muestran en negrilla son los mas altos que se enocntraron para cada elemento (^{232}Th , ^{238}U y ^{40}K)

- *Regiones montañosas en el Departamento de Santander:* Las muestras de La Lizama, Girón y Zapatoca presentan valores muy similares de ^{238}U y de ^{232}Th . Por estar ubicadas relativamente cerca esto era de esperarse.
- *^{40}K en las regiones montañosas en el Departamento de Santander:* Las concentraciones de ^{40}K en Girón (1332(6) Bq/Kg), San Vicente de Chucurí (1519(7) Bq/Kg), Zapatoca (1225(5) Bq/Kg) y La Guayana (1943(8) Bq/Kg) son también bastante altos y del orden de tres veces el promedio mundial. Estas regiones están ubicadas relativamente cerca (ver Figura 10), y por esto no es raro que tengan todas valores similares. Se puede decir entonces que el suelo de esta región del Departamento de Santander tiene un contenido de potasio alto y del orden de 3 veces el valor del promedio mundial. Si observamos el contenido de ^{40}K en La Lizama y Socorro ubicados también en este departamento, nos damos cuenta que en estos lugares el contenido de ^{40}K es del orden del promedio mundial, por lo que no podemos generalizar un alto contenido de ^{40}K en el suelo del Departamento de Santander.
- *^{238}U en las regiones montañosas en el Departamento de Santander:* La muestra de San Vicente

de Chucurí presenta la concentración más alta de ^{238}U (448 Bq/kg) y este valor es más de diez veces el valor del promedio mundial. La muestra de la vereda La Guayana presenta también una alta concentración de ^{238}U (61 Bq/kg) que es del orden de tres veces el promedio mundial. Estos valores para las concentraciones de uranio pueden indicar la presencia de minas de uranio cerca a estos lugares. En estudios realizados en el este de India se determinaron las concentraciones de uranio en rocas de lugares donde existen minas de este elemento. Los valores obtenidos en estos estudios se muestran en la parte inferior de la Tabla 6. Este rango de valores incluye el valor encontrado en la muestra de suelo de San Vicente de Chucurí. Teniendo en cuenta que el estudio realizado en [6] es sobre las mismas rocas se puede ver que el valor de la concentración de uranio en el suelo de este lugar es bastante alta.

Para cuantificar el posible riesgo de estas concentraciones calculamos la dosis anual efectiva mostrada en la Tabla 7.

Lugar	(mSv·y ⁻¹)
San Andrés	0.022(5)
Pamplona	0.038(4)
Cúcuta	0.040(4)
Aguachica	0.043(6)
Santa Marta	0.051(9)
Honda	0.067(4)
Bosconia	0.076(8)
La Lizama	0.085(12)
Socorro	0.117(1)
Zapatoca	0.123(1)
Bogotá	0.133(16)
Girón	0.134(1)
La Guayana	0.189(1)
San Vicente de Chucurí	0.371(1)
Promedio mundial [3]	0.063

Tabla 7: Dosis anual efectiva obtenida usando eq. (26) con las actividades obtenidas en este trabajo y posteriormente convertidas siguiendo la eq. (27).

Los valores de la Tabla 7 están ordenados del más bajo al más alto empezando por la isla de San Andrés (0.022(5) mSv·y⁻¹) y terminando con San Vicente de Chucurí que posee el valor más alto de dosis anual efectiva (0.371(1) mSv·y⁻¹). Obsérvese que las regiones estudiadas en el Departamento de Santander (La Lizama, Socorro, Zapatoca, Girón, La Guayana y San Vicente de Chucurí) se encuentran en la parte baja de la Tabla 7, es decir que poseen los valores más altos de dosis.

Los valores de dosis para regiones fuera del Departamento de Santander son menores a 0.1 mSv/y (excepto por Bogotá con un valor de 0.133(16) mSv·y⁻¹) que es apenas la décima parte del límite considerado peligroso para la salud humana por el ICRP (1 mSv/y). Los valores de dosis en las regiones estudiadas del Departamento de Santander van de (0.085(12) mSv·y⁻¹) en la muestra de La Lizama hasta (0.371(1)

mSv·y⁻¹) en la muestra de San vicente de Chucurí. Estos valores a pesar de ser más altos que las demás regiones se encuentran por debajo del límite mencionado.

Sin embargo los valores de dosis obtenidos en el municipio de San vicente de Chucurí y de la vereda La Guayana son mucho más altos que el promedio mundial y del orden de 4 veces este valor. Además las concentraciones de ²³⁸U y ⁴⁰K en estos lugares fueron las más altas. Todo esto muestra que un estudio más detallado sobre rocas que se encuentren en estas regiones y sobre suelo en lugares cercanos, es un trabajo que valdría la pena y que queda por hacer.

Agradecimientos

Los recursos necesarios para llevar a cabo este trabajo fueron brindados la DIB (División de Investigación de la Universidad Nacional, Bogotá) a través del proyecto de investigación DIB: 14467.

Quiero agradecer además a Liliana Cortés y a Cesar Lizarazo por sus valiosas contribuciones al desarrollo de este trabajo.

Referencias

- [1] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation, report of the united nations scientific committee on the effects of atomic radiation to the general assembly. pages 5–7, 2000. Report Vol. I. **2**
- [2] *Preparation of Gamma-ray Spectrometry Reference Materials RGU-1, RGTh-1 and RGK-1*. Viena, 1987. Report - IAEA/RL/148. **9**
- [3] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation, annex b: Exposures from natural radiation sources. pages 92,93 y 116, 2000. Report Vol. I. **15, 16, 18, 19, 20**
- [4] International Commission on Radiation Units and Measurements. Gamma-ray spectrometry in the environment. Technical report, ICRU, 1994. Report 53. **15**
- [5] Saito K and P Jacob. Gamma ray fields in the air due to sources in the ground. In *Radiat Prot Dosimetry*, volume 58(1), pages 29–45, 1995. **15**
- [6] A K Mahur, Rajesh Kumar, R G Sonkawade, D Sengupta, and Rajendra Prasad. Measurement of natural radioactivity and radon exhalation rate from rock samples of jaduguda uranium mines and its radiological implications. In *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, volume 266, pages 1591–1597, 2008. **18, 19, 20**
- [7] N M Ibrahim, A H Abd El Ghani, S M Showky, E M Ashraf, and M A Farouk. Measurement of radioactivity levels in soil in the Nile Delta and middle Egypt. In *Health Physics*, volume 64, pages 620–627, 1993. **19**
- [8] Narayana Y, Somashekarapp HM, Kurunakara N, Avadhani DN, Mahesh HM, and Sidappa K. Natural radioactivity in the soil samples of coastal karnataka of south india. In *Health Physics*, volume 80, pages 24–33, 2001. **19**

-
- [9] Fernandez-Aldecoa, J.C. Robayna, B. Allende, A. Poffijn, and A. Hernandez-Armas. Natural radiation in tenerife (canary islands). In *Radiation Protection Dosimetry*, volume 45, pages 545–548, 1992. 19
- [10] Karunakara N, Somashekarappa HM, Avadhani DN, Mahesh HM, Narayana Y, and Sidappa K. Radium-226, 232th and 40k distribution in the environment of kaiga, south west coast of india. In *Health Physics*, volume 78, pages 470–476, 2001. 19