

UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

---

## Radiación natural

---

### Instrumentación Nuclear

Pedro Luis Epalza Castillo  
Juan David Hernández Pineda  
Miguel Augusto Rojas Jiménez  
Andrés Felipe Pinzón Harker

*Profesor:*  
Luis Fernando Cristancho Mejia

Universidad Nacional de Colombia  
Bogotá D.C.  
Facultad de Ciencias  
3 de marzo de 2025

# Introducción

El suelo contiene trazas de isótopos radiactivos naturales, principalmente uranio-238 ( $^{238}\text{U}$ ), torio-232 ( $^{232}\text{Th}$ ) y potasio-40 ( $^{40}\text{K}$ ), así como sus productos de desintegración. A estos materiales se les conoce como NORM (Normally Occurring Radioactive Materials), ya que son fuentes naturales de radiación. La determinación de la concentración NORM en muestras ambientales, como suelo y agua, es de gran interés en diversos campos, incluyendo geología, protección radiológica y monitoreo ambiental. En esta práctica, se utilizará espectroscopía gamma para cuantificar el contenido de  $^{40}\text{K}$ , y en futuras etapas, el de los radionucleidos de las cadenas de desintegración del  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ . Debido a que el análisis del  $^{40}\text{K}$  es relativamente más sencillo en comparación con los radionucleidos de las series de  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ , este será el foco principal de nuestro estudio inicial.

## Preparación

Para realizar la preparación se utilizó una muestra de referencia con los estándares IAEA, con datos proveídos de RGU-1 (Óxido de Uranio), RGTh-1 (Óxido de Torio) y RGK-1 (Sulfato de Potasio) con cantidades consignadas en el apéndice D.2 de referencia [1]. Se registrará la intensidad gamma proveniente de tres muestras: una muestra de referencia con identificación AIEA-RG\*, una muestra icognita con identificación DG-EG y el espectro de fondo ambiental, todas las mediciones por un lapso de detección de 24h. Para calibrar el sistema, se utilizará un espectro de calibración obtenido con fuentes conocidas ( $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$ ) para establecer la relación entre la energía y el número de canal del detector, utilizando la ecuación de calibración (0.1), proporcionando los datos mostrados en la tabla 1.

$$E_{\gamma}(\text{keV}) = a_0 + a_1 \times \text{canal}, \quad (0.1)$$

donde  $E_{\gamma}$  son las medidas de energía respecto cada canal en keV, y donde  $a_0$  y  $a_1$  son los parámetros de linealización de la calibración, teniendo respectivamente unidades de keV y keV/canal. Los coeficientes  $a_0$  y  $a_1$  serán obtenidos a partir del espectro de calibración registrado en relación a las mediciones `cal_133Ba22Na137Cs60Co_600s_1` de los archivos.

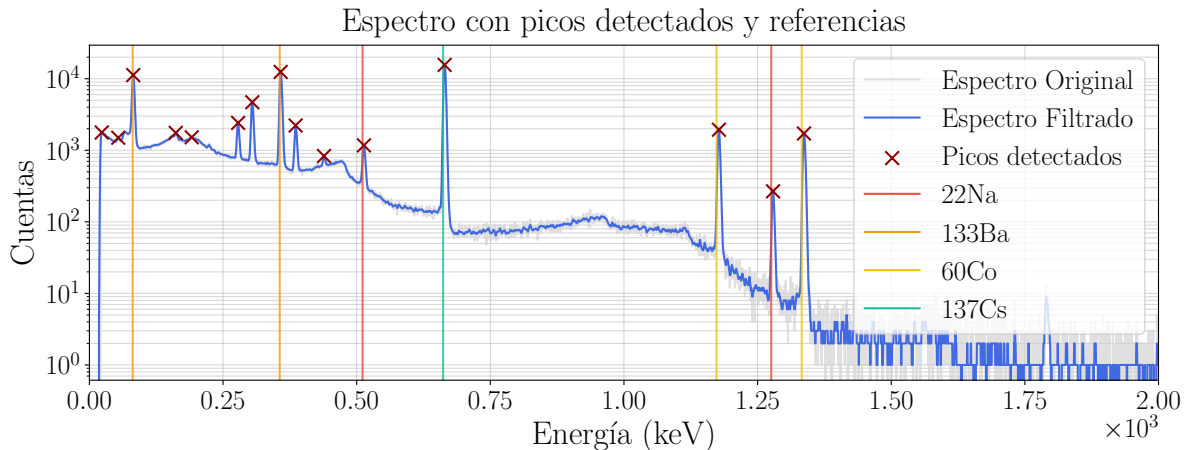


Figura 1: Espectro calibrado con los elementos  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$ .

Parámetro	Valor
$a_0$ [keV]	-0.96(13)
$a_1$ [keV/canal]	0.48092(6)

Tabla 1: Parámetros de calibración de energía.

Para la preparación de muestras, se utilizará una cantidad de 500 g de suelo seco, acondicionada en una botella plástica de geometría idéntica a la de la muestra de referencia para conservar las condiciones geométricas (como la sección eficaz  $\Delta\Omega$ ). Dado que las actividades naturales son bajas, requiere aplicar un blindaje de plomo y un tiempo de adquisición prolongado de 24 horas.

En la adquisición de datos, se registrarán los espectros gamma de la muestra problema, la referencia y el fondo, almacenándolos en archivos separados según la Tabla 4.1 de [1]. Para el procesamiento de datos, se sustraerá el espectro de fondo de cada medición para obtener los espectros “puros” de la muestra y la referencia. Luego, mediante el análisis de los picos característicos en el espectro, se calculará el contenido de  $^{40}\text{K}$  utilizando una relación de proporcionalidad entre la intensidad medida en la muestra y en la referencia.

## 1. Demostración

La actividad de un isótopo radiactivo está dada por:

$$A(^{40}\text{K}) = \frac{N(^{40}\text{K})}{\tau} \quad (1.1)$$

donde la vida media  $\tau$  se relaciona con el período de semi-desintegración  $T_{1/2}$ , mediante  $\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$ . Sustituyendo en la ec. 1.1.

$$A(^{40}\text{K}) = \ln 2 \frac{N(^{40}\text{K})}{T_{1/2}} \approx \frac{0.693 N(^{40}\text{K})}{T_{1/2}} \quad (1.2)$$

Aproximando  $\ln 2 \approx 0.693$ . El número de núcleos  $N(^{40}\text{K})$  se expresa en términos de la fracción isotópica  $\varphi(^{40}\text{K})$  como:

$$N(^{40}\text{K}) = \varphi(^{40}\text{K})N(\text{K}) = \varphi(^{40}\text{K})N_A \frac{m(\text{K})}{w(\text{K})}, \quad (1.3)$$

donde  $N_A$  es el número de Avogadro,  $m(\text{K})$  la masa de potasio y  $w(\text{K})$  es el peso atómico. Resultando la actividad  $A(^{40}\text{K})$  de las ecuaciones 1.1 y 1.3 como:

$$A(^{40}\text{K}) = \frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot \varphi(^{40}\text{K})N_A \frac{m(\text{K})}{M(\text{K})} \quad (1.4)$$

Para simplificar, añadimos el termino de *concentración*  $C_m(K) = m(K)/m$  y se obtiene lo requerido en ec. 1.5.

$$A(^{40}\text{K}) = \frac{0.693}{T_{1/2}} N_A \frac{\varphi(^{40}\text{K})}{w(\text{K})} C_m(\text{K}) m \quad (1.5)$$

donde  $m$  es la masa total de la muestra.

## 2. Intensidades

Para las intensidades de las muestras se notó a  $I_r$  como la intensidad gamma del pico de 1461 keV obtenida para la muestra de referencia, e  $I_m$  la intensidad del mismo pico obtenida para la muestra de suelo. Se reportan las mediciones obtenidas en la tabla 2 según la ec. 5.1, explicando los resultados en la sección posterior.

Parámetro	Valor [cuentas]
$I_r$	$1.353(14) \times 10^5$
$I_m$	261(9)

Tabla 2: Parámetros ajustados de las muestras de referencia y de estudio para una energía de 1461 keV.

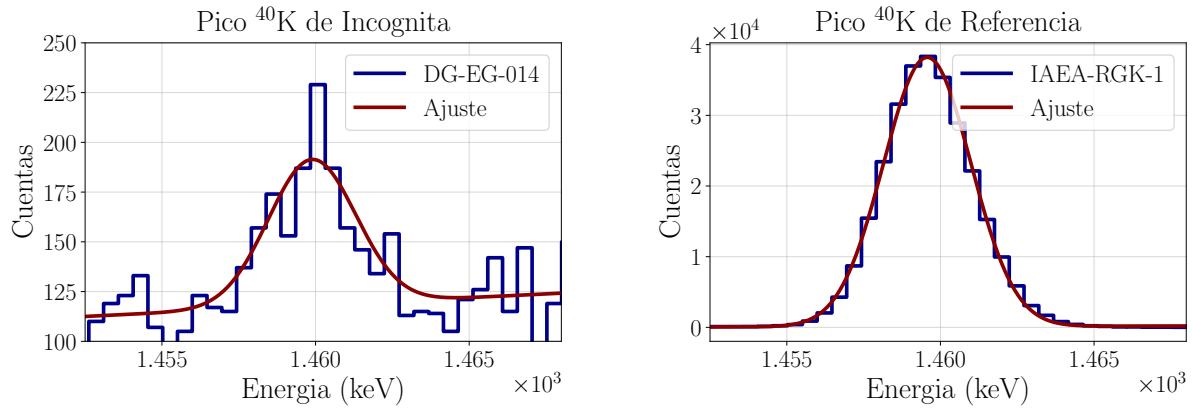
Según los datos de la tabla 2, se observa que la intensidad de la muestra de referencia es considerablemente mayor a la muestra obtenida del suelo, lo que nos hace pensar que la muestra obtenida tiene baja actividad para el pico de 1461 keV esto debido a la posible baja presencia del  $^{40}\text{K}$  en la muestra del suelo tomada, puede darse también por contener otros elementos que afectan la detección de la radiación gamma del  $^{40}\text{K}$ .

## 3. Ajustes

Los ajustes realizados a los picos de energía  $E_\gamma = 1461 \text{ keV}$  se realizaron con base a la ecuación estándar 3.1 con fondo.

$$G(E_\gamma) = A \exp\left(-\frac{(E_\gamma - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) + a_0 + a_1 E_\gamma \quad (3.1)$$

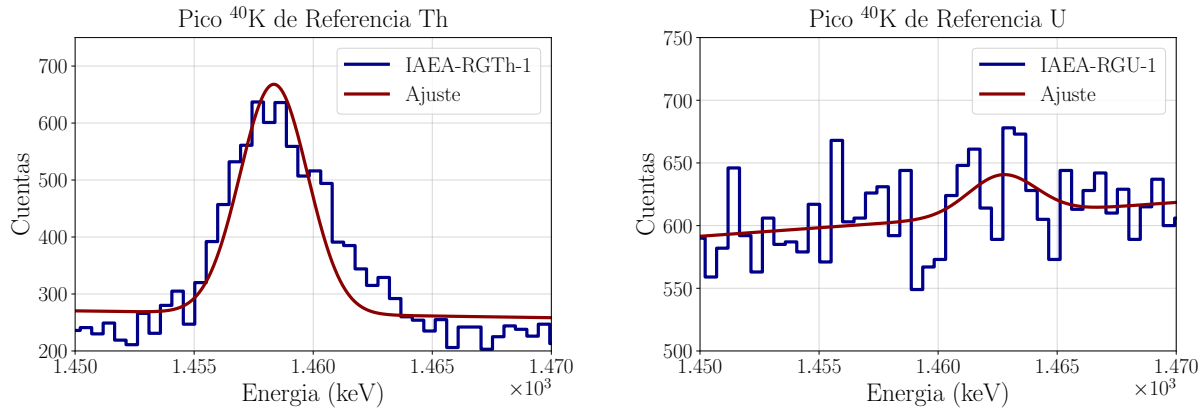
Donde  $G(x)$ , es el ajuste gaussiano en unidades de cuentas, dependiente de  $E_\gamma$  que representa la energía en keV. Los parámetros serán:  $A$  es la amplitud en unidades de cuentas,  $\mu$  es el centroide de la distribución en keV,  $\sigma$  es la desviación estándar en keV; y los parámetros de fondo lineal serán  $a_0$  en cuentas y  $a_1$  en cuentas/keV. Se observan en las figuras 2a y 2b los ajustes propuestos para el pico del  $^{40}\text{K}$ , también se generaron los ajustes de las otras referencias, solo como ejemplo de que aún se encuentra el isótopo en esas muestras, pues no tiene ninguna utilidad dado que las cantidades del isótopo son insignificantes.



(a) Espectro de muestra desconocida NORM. (b) Espectro de referencia estandarizado IAEA (RGK-1)

Figura 2: Pico 1461 keV del  $^{40}\text{K}$  del decaimiento  $\beta^+$  ajustada tal que  $\sigma_r = \sigma_m$ .

De la gráfica (a) de la figura 2, se puede notar que la gaussiana no se ajusta del todo bien con los datos, esto hará que la incertidumbre sea alta, cosa contraria a la gráfica (b) que es la muestra de referencia, ya que esta está bien parametrizada el ajuste es muy bueno.



(a) Espectro de muestra estandarizado IAEA (RGTh-1). (b) Espectro de referencia estandarizado IAEA (RGU-1)

Figura 3: Pico 1461 keV del  $^{40}\text{K}$  del decaimiento  $\beta^+$  ajustada tal que  $\sigma_r = \sigma_m$  para referencias diferentes, se puede notar que al menos en 3a hay una un pico posible, mientras que en 3b no se puede describir ningún comportamiento.

Para la muestra de referencia del  $^{232}\text{Th}$  gráfica (a) de la figura 4, se observa que el ajuste no es tan malo, sin embargo, no es mejor que el mostrado en la gráfica (b) de la figura 2. Para la gráfica (b) de la figura 4 el ajuste muestra nuevamente una incertidumbre grande, debido a que se usó el  $^{238}\text{U}$  como referencia no tiene carácter de referencia en isótopos del K. Se reportan más que todo para tener en cuenta de que existen muestras de estos elementos isotópicos aún en materiales de referencia que no son propiamente los del tipo requerido, una evidencia más de como NORM “contamina” toda muestra.

## 4. Resultados numéricos ajustes

De las gráficas de la figura 2 se presentan los resultados numéricos obtenidos en el experimento, incluyendo sus incertidumbres mostrado en la tabla 3. El valor de  $C_m(K)$  representa la *concentración relativa* de  $^{40}\text{K}$ , utilizando los valores de referencia de  $I_m$  y  $I_r$  según la ec. 5.3.

Parámetro	Valor	Unidad
$\sigma$	1.86(2)	keV
$M$	$38.078(26) \times 10^3$	cuentas/keV
$I_m$	261(29)	cuentas
$I_r$	$1.353(14) \times 10^5$	cuentas
$C_m(K)$	$9.11(11) \times 10^{-2}$	%

Tabla 3: Resumen de los resultados obtenidos con sus respectivas incertidumbres para el ajuste realizado al  $^{40}\text{K}$ .

## 5. Concentración de potasio

Para calcular la concentración de potasio en la muestra de interés (DG-EG), seguimos el mismo procedimiento que con la muestra de referencia (RGK).

La intensidad  $I$  se obtiene mediante la ec. 5.1

$$I = \sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot M, \quad (5.1)$$

con propagación de incertidumbre ( $\Delta I$ ) dada por la ec. 5.2

$$\Delta I = I \sqrt{\left(\frac{\sigma_\sigma}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_M}{M}\right)^2} \quad (5.2)$$

Luego, la concentración  $C_m(K)$  se obtiene con la ec. 5.3

$$C_m(K) = \frac{I_m \cdot C_r(K)}{I_r} \quad (5.3)$$

Y su incertidumbre se propaga como:

$$\sigma_{C_m} = C_m(K) \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_m}}{I_m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_r}}{I_r}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{C_r}}{C_r}\right)^2} \quad (5.4)$$

Los valores obtenidos para cada parámetro de  $I_\gamma$  de  $^{40}\text{K}$  en la muestra se reportan en la tabla 4

$C_m(K)$ (%)	0.0911(11)
--------------	------------

Tabla 4: Resultados del cálculo de concentración de  $^{40}\text{K}$ .

## 6. Conversión

La concentración de  $^{40}\text{K}$  en la Tabla D.2 [1] está en porcentaje como  $C_r=44.8\%$ , así que  $C_m(\text{K})$  también está en porcentaje. Para convertir este resultado a partes por millón (ppm) se tiene en cuenta la siguiente relación

$$1\% = 10^4 \text{ ppm}$$

La concentración de potasio en la muestra RGK-1 en la Tabla D.2 es de  $44.8(3)\%$ , por lo tanto, la concentración en ppm es

$$C_m(\text{K}) = 44.8(3) \cdot 10^4 \text{ ppm} = (4.48(3) \times 10^5) \text{ ppm}$$

Y si hacemos el mismo proceso para la concentración hallada en tab. 4 se obtiene

$$C_m(\text{K}) = 0.0911(11) \cdot 10^4 \text{ ppm} = (9.11(11) \times 10^2) \text{ ppm} \quad (6.1)$$

## 7. Partes por millón $^{40}\text{K}$

El potasio natural tiene una abundancia isotópica del  $0.0117\%$  de  $^{40}\text{K}$ , por lo que la concentración en ppm es:

$$C_m(^{40}\text{K}) = (9.11(11) \times 10^2) \text{ ppm} \cdot (1.17 \times 10^{-3}) = 1.066(13) \text{ ppm} \quad (7.1)$$

Lo que indica que en la muestra hay una concentración de  $1.066(13) \text{ ppm}$  del isótopo  $^{40}\text{K}$  en la muestra total.

## 8. Actividad

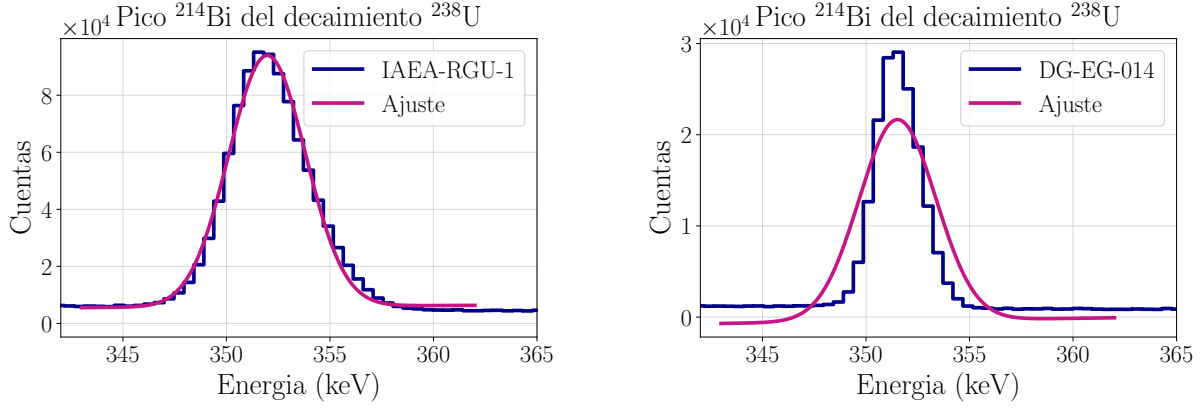
La actividad  $A$  se determina reemplazando los datos obtenidos en la ecuación 1.5, donde  $T_{1/2} = 1.3 \times 10^9 \text{ a}$ ,  $\varphi(^{40}\text{K}) = 0.000117$ ,  $m = 500 \text{ g}$  es la masa total de la muestra,  $N_A$  es  $6.022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol}$  es el número de Avogadro, y  $M = 39.1 \text{ g/mol}$  es la masa molar del potasio. Reemplazando estos valores en ec. 8.1, se obtiene

$$A(^{40}\text{K}) = \frac{0.693}{3.938 \times 10^{16} \text{ s}} \times (0.000117) \times (9.11(11) \times 10^{-2}) \\ \times (6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \times \frac{500 \text{ g}}{39.1 \text{ g/mol}} = 1.44(1) \times 10^1 \text{ Bq} \quad (8.1)$$

Lo que indica que la actividad radioactiva de la muestra de  $^{40}\text{K}$  es de  $1.44(1) \times 10^1 \text{ Bq}$ , se ve que es mucho menor dado el orden normal de una actividad radiactiva estándar en los kBq.

## 9. Energía de 352 keV del $^{238}\text{U}$

Para determinar la concentración y la actividad de la radiación proveniente del  $^{238}\text{U}$  en la energía de 352 keV, seguimos un procedimiento análogo al empleado a la sección anterior. En las figs. 4 se realiza el ajuste de gaussiana con fondo y se reportan los resultados en 5.



(a) Espectro de muestra estandarizado IAEA (RGU-1). (b) Espectro de muestra NORM con  $\sigma_r = \sigma_m$ .

Figura 4: Pico 353 keV del decaimiento del isótopo  $^{238}\text{U}$  de la muestra con  $\sigma = 1.86(4)$  keV.

Según la tabla D.2 de referencia [1] tenemos  $C_r(\text{U}) = 400.0(2) \mu\text{g g}^{-1}$  donde las unidades son equivalentes a ppm, por tanto si realizamos el ajuste y aplicamos la ec. 5.3 de concentración obtendremos en unidades de ppm.

Parámetro	Valor	Unidad
$\sigma$	1.86(2)	keV
$M$	$38.078(26) \times 10^3$	cuentas/keV
$I_m$	$1.03(8) \times 10^5$	cuentas
$I_r$	$4.09(1) \times 10^5$	cuentas
$C_r(\text{U})$ (%)	$4.00(2) \times 10^{-2}$	%

Tabla 5: Resumen de los resultados obtenidos con sus respectivas incertidumbres para el ajuste realizado al  $^{40}\text{K}$ .

Según el mismo proceso previo, se determina la concentración de la muestra y se reporta en tab. 7

$C_m(\text{U})$ (%)	$1.349(97) \times 10^{-3}$
---------------------	----------------------------

Tabla 6: Resumen de los resultados obtenidos con sus respectivas incertidumbres para el ajuste realizado al  $^{238}\text{U}$ .

La concentración en ppm resulta del  $^{238}\text{U}$  como  $C_m(^{238}\text{U}) = 100(8)$  ppm



Los resultados de actividad  $A$  calculados como procesos anteriores son entonces

$$\overline{A(^{238}\text{U})} = 6.21(51) \times 10^2 \text{ Bq}$$

Tabla 7: Resumen de los resultados obtenidos con sus respectivas incertidumbres para el ajuste realizado al  $^{40}\text{K}$ .

## 10. Partes por millón $^{238}\text{U}$

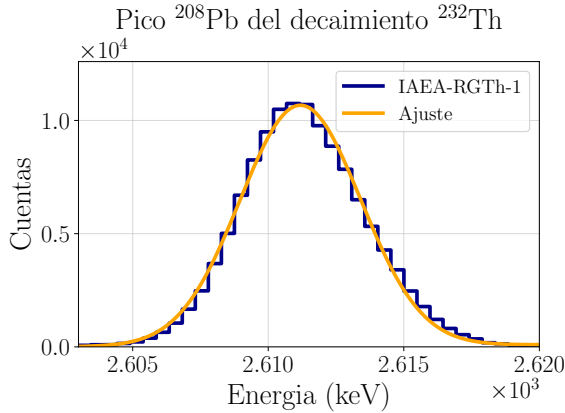
El potasio natural tiene una abundancia isotópica del 0.0117 % de  $^{40}\text{K}$ , por lo que la concentración en ppm es:

$$C_m(^{40}\text{K}) = (9.11(11) \times 10^2) \text{ ppm} \cdot (1.17 \times 10^{-3}) = 10.66(13) \text{ ppm} \quad (10.1)$$

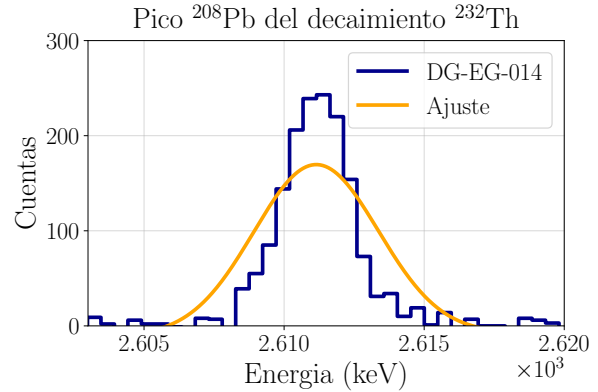
Lo que indica que en la muestra hay una concentración de 10.66(13) ppm del isótopo  $^{40}\text{K}$  en la muestra total.

## 11. Energía de 2614.5 keV del $^{232}\text{Th}$

Para determinar la concentración y la actividad de la radiación proveniente del  $^{232}\text{Th}$  en la energía de 2614.5 keV, seguimos un procedimiento análogo al empleado en las secciones anteriores. En las figs. 5 se realiza el ajuste de gaussiana con fondo y se reportan los resultados en tab. 8



(a) Espectro de muestra estandarizado IAEA (RGTh-1).



(b) Espectro de muestra NORM.

Figura 5: Pico 2614.5 keV del decaimiento del isótopo  $^{238}\text{U}$  encontrado en  $\mu = 2611.14(19) \text{ keV}$ .

Parámetro	Valor	Unidad
$I_r$	$5.9(1) \times 10^4$	cuentas
$I_m$	$1.00(7) \times 10^3$	cuentas
$C_r(\text{Th})$	$8.00(2) \times 10^{-4}$	%
$C_m(\text{Th})$ (%)	$1.349(9) \times 10^{-3}$	%

Tabla 8: Resumen de los resultados obtenidos con sus respectivas incertidumbres para el ajuste realizado al  $^{40}\text{K}$ .

La concentración en ppm resulta como  $C_m(^{232}\text{Th}) = 13.5(1) \text{ ppm}$ .

Los resultados de las concentraciones halladas como anteriormente, están descritas en su totalidad en la tabla 8, con estos resultados basta calcular la actividad como en ec. 1.1, teniendo en cuenta el porcentaje isotópico en 100 % del isótopo  $^{232}\text{Th}$ ,  $w = 238.029 \text{ u}$  y las concentraciones antes descritas con un peso de  $m = 500 \text{ gr}$ .

$$\overline{A(^{232}\text{Th})} \quad 2.72(20) \times 10^1 \text{ Bq}$$

Tabla 9: Resumen de los resultados obtenidos con sus respectivas incertidumbres para el ajuste realizado al  $^{40}\text{K}$ .

La cuál resulta leible igualmente pero contrastante con la del uranio que es aún menor, refleja en el mismo orden de  $^{40}\text{K}$ .

## Referencias

- [1] F. Cristancho-Mejía, “Instrumentación nuclear. prácticas experimentales,” 1 2025.