

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Calibración de un Detector Centellador

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
17 de febrero de 2025

Introducción

En la espectroscopia de radiación gamma, la calibración de los detectores es un paso fundamental para garantizar la precisión en la medición de energías y la correcta identificación de radio-nucleidos. En esta práctica, se utilizó un detector centellador de NaI (Tl) de 3" × 3", un material ampliamente empleado en la detección de fotones debido a su alta eficiencia de detección y resolución moderada en comparación con otros detectores, como los de germanio.

El objetivo principal de esta práctica es calibrar en energía el detector, asociando los canales del analizador multicanal (MCA) con las energías de referencia de diferentes fuentes radiactivas (^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs y ^{57}Co). Para ello, se registraron espectros gamma utilizando una configuración experimental controlada y se aplicaron métodos de ajuste para la identificación de los picos característicos de cada fuente.

Además, se analizaron características espectroscópicas clave, como el centroide de los picos, la resolución (FWHM) y la intensidad de los fotopicos. También se llevó a cabo una corrección de fondo para mejorar la precisión en la identificación de los picos gamma y se exploró la capacidad del detector para resolver líneas espectrales cercanas, en particular en el caso del ^{57}Co .

Los resultados obtenidos permitirán evaluar la precisión y linealidad de la calibración en energía y sentarán las bases para futuros estudios relacionados con la eficiencia de detección y la identificación de radio-nucleidos mediante espectroscopia gamma.

Descripción del equipo utilizado

Para la adquisición y análisis de los espectros gamma, se empleó un sistema de detección basado en un detector centellador de NaI (Tl) de dimensiones (3 in × 3) in. Este tipo de detector es ampliamente utilizado en espectroscopia gamma debido a su alta eficiencia en la detección de fotones y su respuesta rápida a la radiación incidente.

1. Detector de NaI (Tl) El detector consiste en un cristal de yoduro de sodio activado con talio, el cual emite luz en la región visible cuando interactúa con radiación ionizante. Esta luz es proporcional a la energía del fotón incidente y es captada por un fotomultiplicador (PMT), que la amplifica y la convierte en una señal eléctrica.
2. Fotomultiplicador (PMT) El fotomultiplicador acoplado al cristal centellador tiene la función de:
 - Detectar la luz producida en el centellador y transformarla en electrones mediante el efecto fotoeléctrico.
 - Multiplicar la señal eléctrica en una serie de diodos, aumentando su amplitud hasta obtener un pulso medible.
 - Producir una salida de voltaje proporcional a la energía del fotón gamma incidente.
3. Analizador Multicanal (MCA) El MCA es un dispositivo electrónico que recibe la señal del fotomultiplicador y la clasifica en canales según su amplitud.

- Convierte la señal analógica en digital mediante un convertidor analógico-digital (ADC).
 - Almacena las cuentas en un histograma, donde cada canal representa un rango de energías específico.
 - Permite la identificación de picos en el espectro y la posterior calibración en energía.
4. Fuentes radiactivas utilizadas Para la calibración del detector, se emplearon fuentes emisoras de radiación gamma bien conocidas, como:
- $^{22}\text{Na} \rightarrow$ Fotopicos en 511 keV y 1275 keV.
 - $^{60}\text{Co} \rightarrow$ Dos fotopicos en 1173 keV y 1332 keV.
 - $^{137}\text{Cs} \rightarrow$ Pico en 662 keV.
 - $^{57}\text{Co} \rightarrow$ Picos en 122 keV y 136 keV.
5. Software de Adquisición y Análisis Los espectros obtenidos fueron analizados mediante **python** y un software de procesamiento espectral llamado **Kspect** que permitió:
- La detección y ajuste de picos mediante modelos gaussianos.
 - La calibración en energía utilizando los valores de referencia de las fuentes.
 - El análisis del fondo espectral y la estimación de la resolución del detector.

1. Determinación de Cantidades Espectroscópicas Experimentales

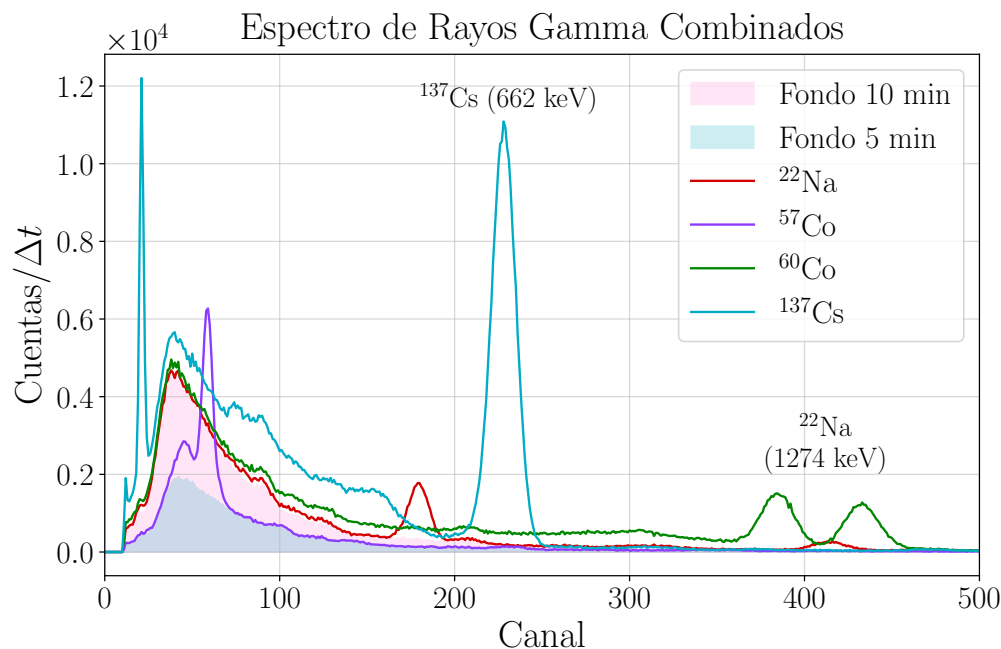


Figura 1: Espectros γ utilizados en la práctica experimental, con los fondos ambientales demarcados en áreas.

Se empieza describiendo los espectros gamma combinados en la fig. 1, donde se determinan los picos principales mínimo y máximo característicos, además el comportamiento general con fondo ambiental. Al eliminar el fondo ambiental a partir de una medición propia del ambiente se puede visualizar claramente la radiación propia del material de estudio, e.i. el espectro de ^{57}Co .

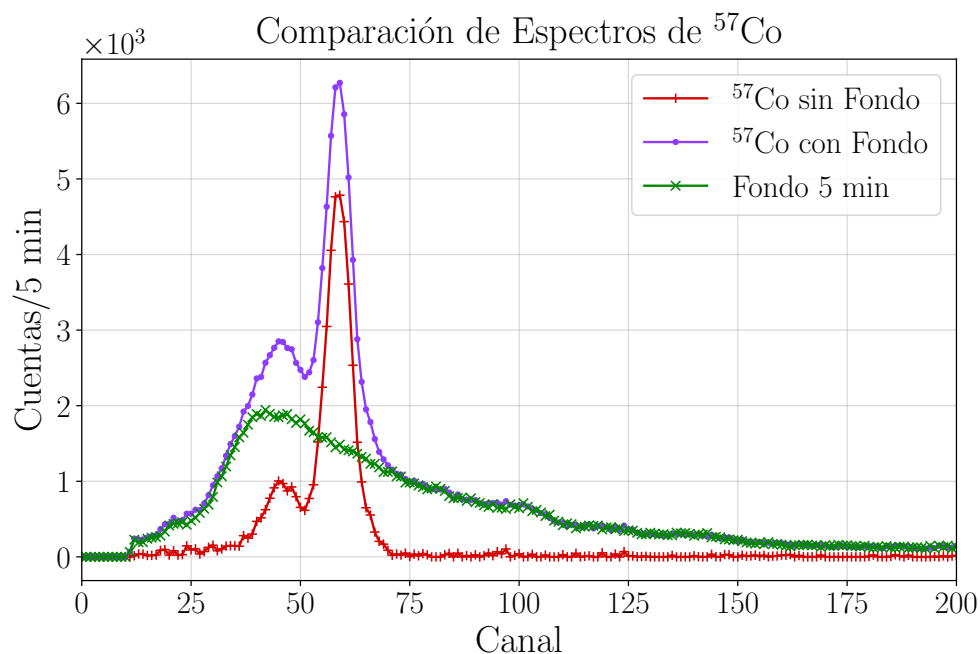


Figura 2: Espectro general del ^{57}Co sin fondo ambiental centrado donde existe más radiación ambiental. Se verifica las diferencias entre los espectros.

Haciendo la respectiva separación de espectros presentes en los datos consolidados experimentalmente, se procede a hacer dicha operación de cada uno como se ve en la fig 3.

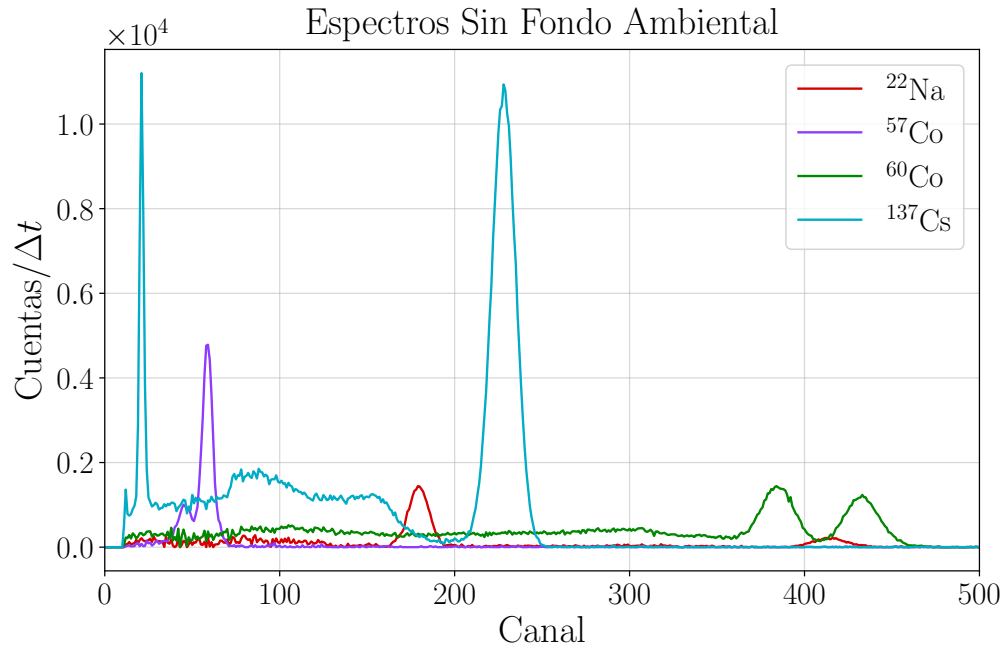


Figura 3: Espectros de cada una de las muestras.

A partir de la fig. 4, se identifican inmediatamente los picos de radiación característica del ^{60}Co , ubicados contiguos posterior al espectro Compton [1], en las energías 1173.2 keV (pico 1) y 1332.5 keV (pico 2), las dos características de transición gamma por núcleo excitado luego del decaimiento a ^{60}Ni por radiación β^- con más del 99 % del decaimiento total. Se ajusta la distribución gaussiana a estos picos de radiación (véase fig. 4) y los parámetros obtenidos en la tabla 1.

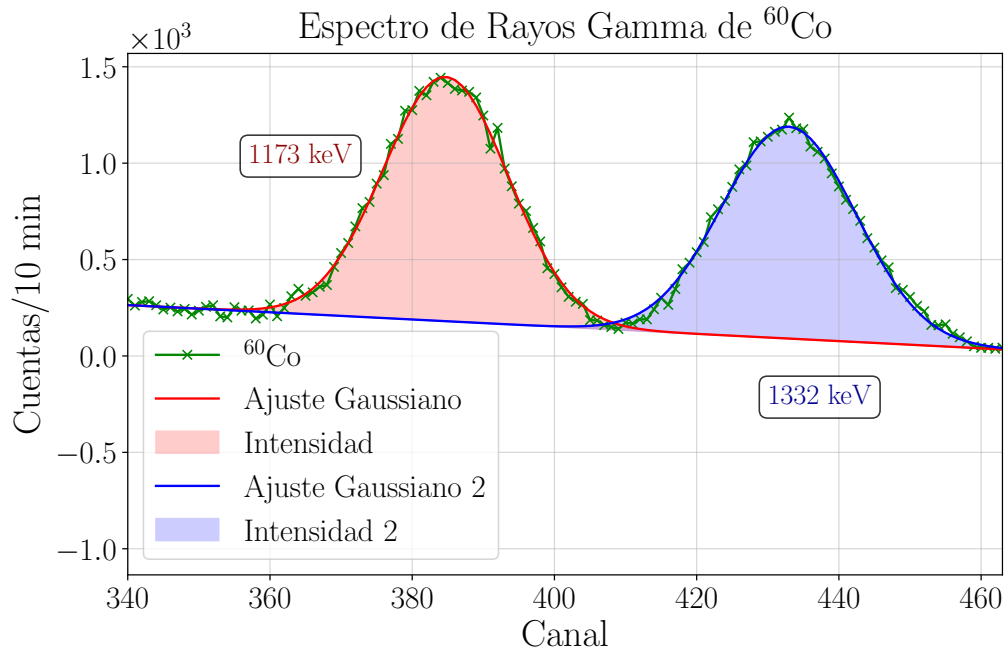


Figura 4: Picos de radiación característica del ^{60}Co ajustados según distribución gaussiana dadas por tabla

Parámetro	Gaussiana 1	Gaussiana 2
Centroide (μ)	384.137 (canales)	432.702 (canales)
(σ)	10.675 (canales)	10.146 (canales)
FWHM	25.156 (canales)	23.898 (canales)
Intensidad	1392.214 (cuentas)	1180.421 (cuentas)

Tabla 1: Parámetros del ajuste de la suma de gaussianas en ^{60}Co (1173.2 KeV y 1332.5 KeV).

A partir de la fig. 3, se identifican 2 picos de radiación característica del ^{137}Cs ubicados: en los primeros canales, el rango de los rayos X a 32 keV, se genera por captura electrónica del ^{137}Ba metaestable; el de mayor energía, por transición gamma del decaimiento. Se ajusta la distribución gaussiana a estos picos de radiación en figs. 5 y 6.

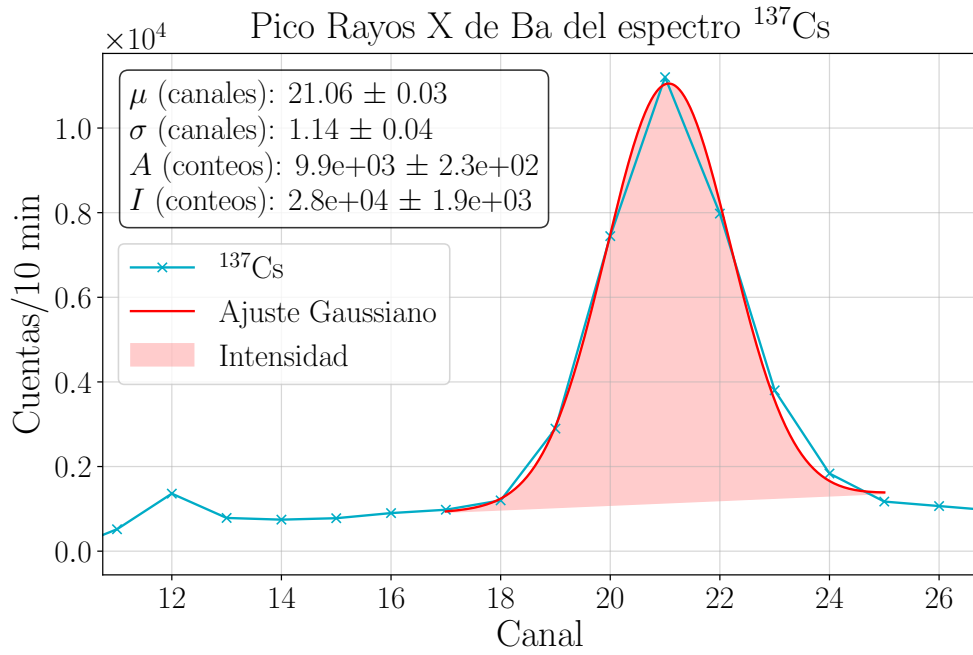


Figura 5: Radiación de ^{137}Cs en el pico del Bario metaestable de 32 keV.

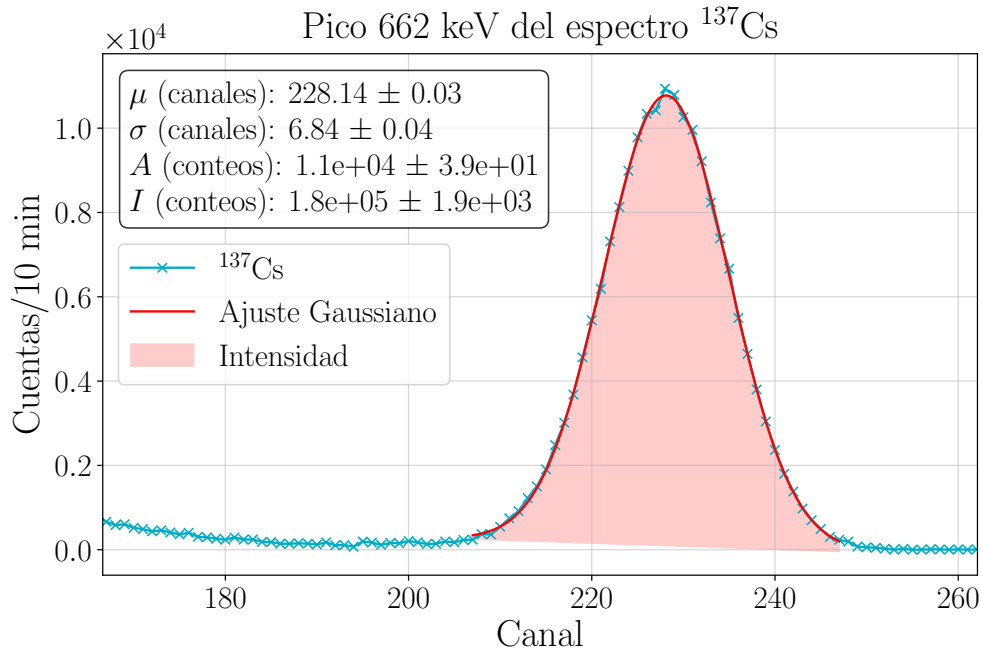


Figura 6: Radiación de ^{137}Cs en el pico γ .

A partir de la figs. 7 y 8, se identifican 2 picos de radiación característica del ^{22}Na [1] ubicados posterior a Compton en: 511.0 keV, referentes a aniquilación de pares electro-positrón debida al decaimiento β^+ ; y en 1274.5 keV, debidos a transición γ por desexcitación. Se ajusta la distribución gaussiana a estos picos de radiación.

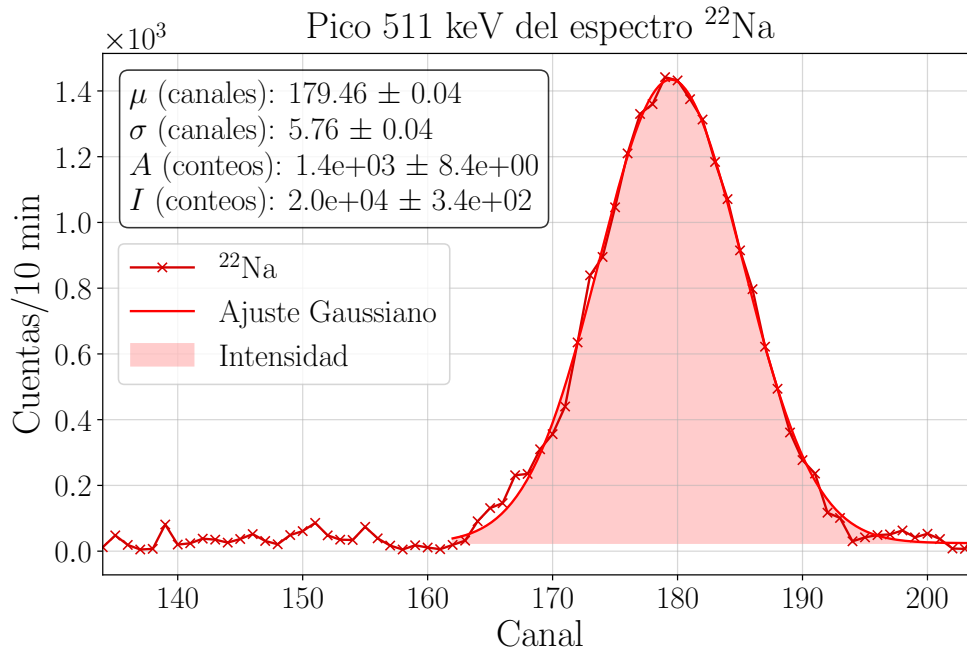


Figura 7: Radicación de ^{22}Na en el pico de 552 keV.

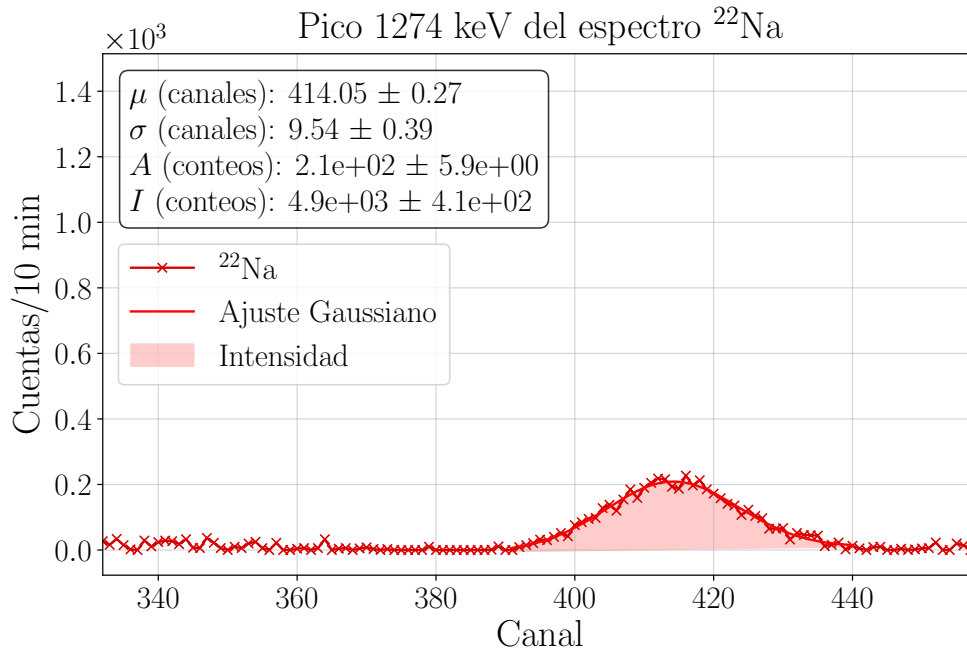


Figura 8: Radicación de ^{22}Na en el pico de 1274 keV.

Para el isótopo ^{57}Co se identifican 2 picos según los datos: el primero debería detectarse por decaimiento γ en 122 keV, pero realmente se identifica el pico de escape en 102 keV teóricamente, encontraríamos el doblete entonces en el pico general del 136 keV, del cual ajusta suficientemente bien como para asumir un solo pico. Se gráficán y determinan los parámetros en las figs. 10 y 9.

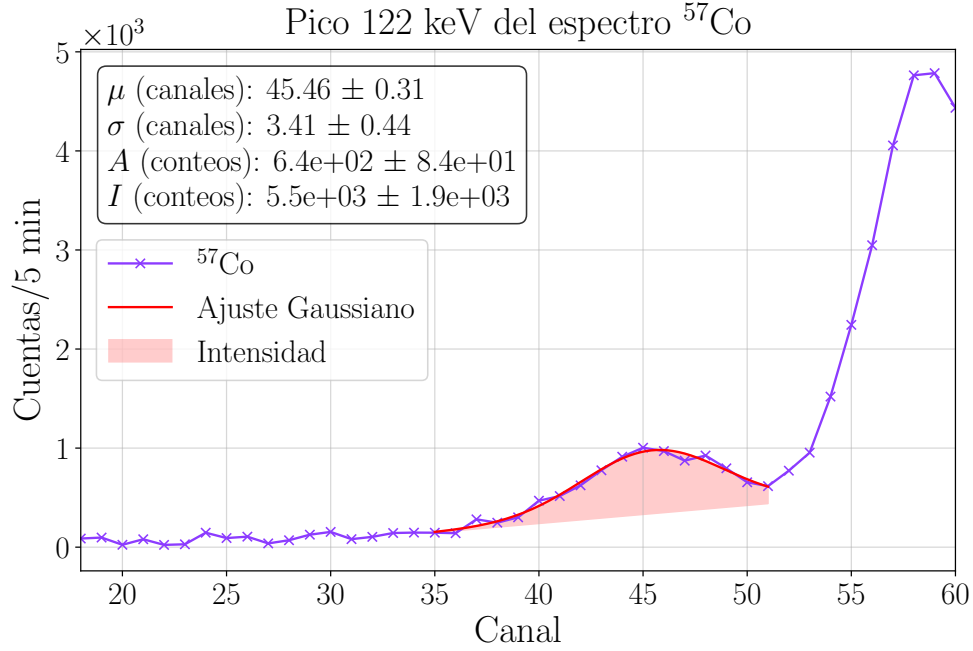


Figura 9: Pico de energía 122 keV del elemento ^{57}Co corrido por “peak escape”

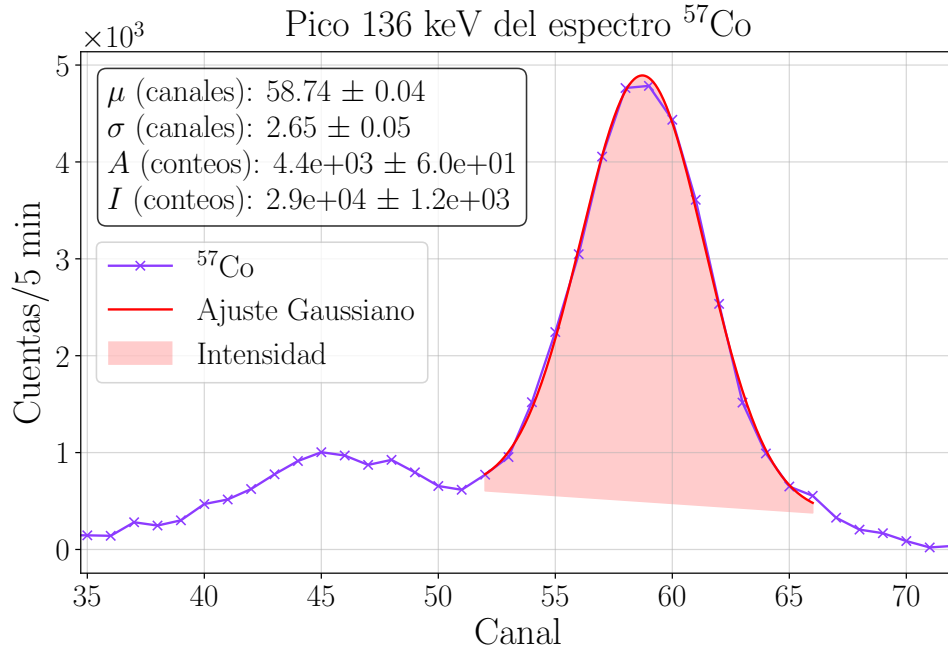


Figura 10: Pico de energía 136 keV del elemento ^{57}Co

2. Calibración en energía

El proceso de calibración de energía del detector se realizó utilizando fuentes radiactivas con energías conocidas, específicamente ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs y ^{57}Co procesados sin fondo ambiental.

Se identificaron los picos correspondientes a las energías características de cada isótopo y se asignaron a sus respectivas posiciones en los canales del detector según Apéndice [2].

Se llevó a cabo un ajuste lineal entre los canales y las energías conocidas de los picos, utilizando la relación 2.1.

$$E_{\gamma}(\text{keV}) = a_0(\text{keV}) + a_1 \left(\frac{\text{keV}}{\text{canal}} \right) \times x(\text{canal}) \quad (2.1)$$

donde los coeficientes a_0 y a_1 fueron determinados mediante un ajuste de mínimos cuadrados y x es el número de canal. La calidad del ajuste se evaluó con el valor $R^2 = 0.9995$, y se calcularon los errores en la pendiente y la intersección para estimar la incertidumbre de la calibración en la tabla 2.

La figura 11 muestra el ajuste lineal realizado entre los canales y las energías, representado por la recta roja. Los puntos experimentales están marcados con barras de error, y el ajuste refleja la relación entre los datos experimentales y las energías conocidas de los isótopos utilizados.

a_0 (keV)	a_1 (keV/canal)
-40 ± 8	3.16 ± 0.03

Tabla 2: Parámetros de la calibración de energía del detector

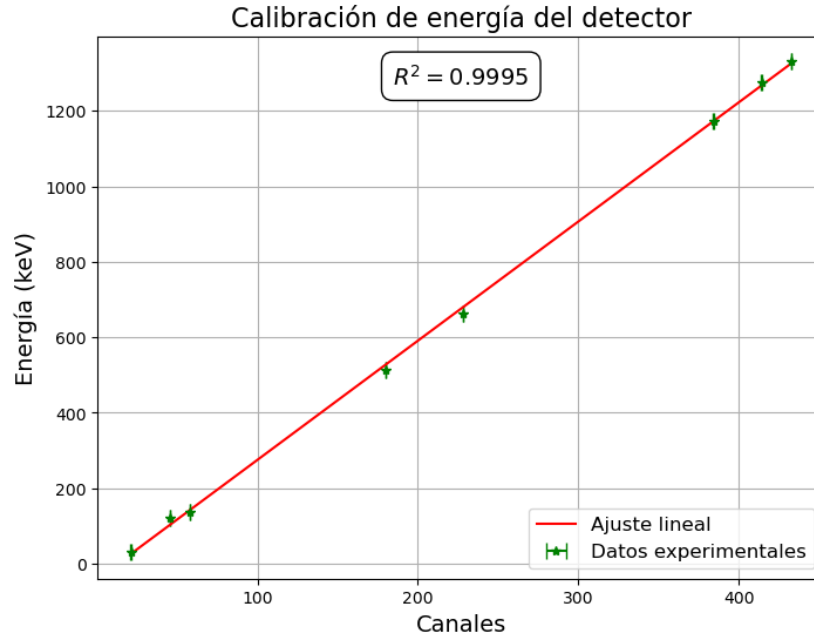


Figura 11: Función de calibración Canales vs Energía del detector

3. Examen de la calidad de la calibración en energía

En la tabla 3, se examina la calidad de la calibración de energía para varios picos de rayos gamma, rayos X y otros picos relevantes, presentando los canales experimentales, las energías teóricas y obtenidas mediante la calibración E_{γ} , los errores relativos y el valor del FWHM.

Canal (canales) (experimental)	E_γ (keV) (teórica)	E_γ (keV) (ec.2.1)	ΔE (keV)	%	FWHM (keV)
21	32.8	26(8)	6.8	20.7	8.60(8)
45	122.1	102(8)	20.1	16.5	25.82(25)
58	136.5	143(8)	6.5	4.76	19.91(19)
179	511.0	525(10)	14	2.74	43.45(41)
228	661.7	680(10)	18.3	2.77	50.78(48)
384	1173.2	1173(14)	0.2	0.02	68.10(65)
415	1274.5	1271(15)	3.5	0.27	70.53(67)
433	1332.5	1328(15)	4.5	0.34	71.76(68)

Tabla 3: Examen de la calidad de la calibración energía.

Se observa que el error relativo en la energía es más alto para los picos con canales bajos, como el del canal 21, con un valor de 2.44 %. Este comportamiento es consistente con lo esperado, ya que los picos de baja energía suelen presentar una mayor incertidumbre. Esto se debe a factores como la resolución limitada del detector en el rango de bajas energías, que puede afectar la precisión de la medición.

En contraste, para los picos de mayor energía, como los del los canales 415 y 432 , los errores relativos son más pequeños, acercándose a 0 %. Este comportamiento sugiere que la calibración es más precisa en el rango de altas energías, donde las señales son más fuertes, la relación entre los canales y las energías es más clara y la baja resolución del detector no presenta tanto impacto en los resultados. De esta manera, la tabla proporciona una evaluación detallada de los errores en la calibración, permitiendo identificar áreas donde la precisión puede mejorarse, especialmente en los picos de baja energía.

Adicionalmente se encuentra que, el ancho de los picos gaussianos representado por el FWHM, tiende a ser más pequeño en energías más bajas, replicando el comportamiento previo dado que la incertidumbre está relacionada con el FWHM en el ajuste gaussiano como

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \approx 2.355\sigma \quad (3.1)$$

4. Ajuste FWHM

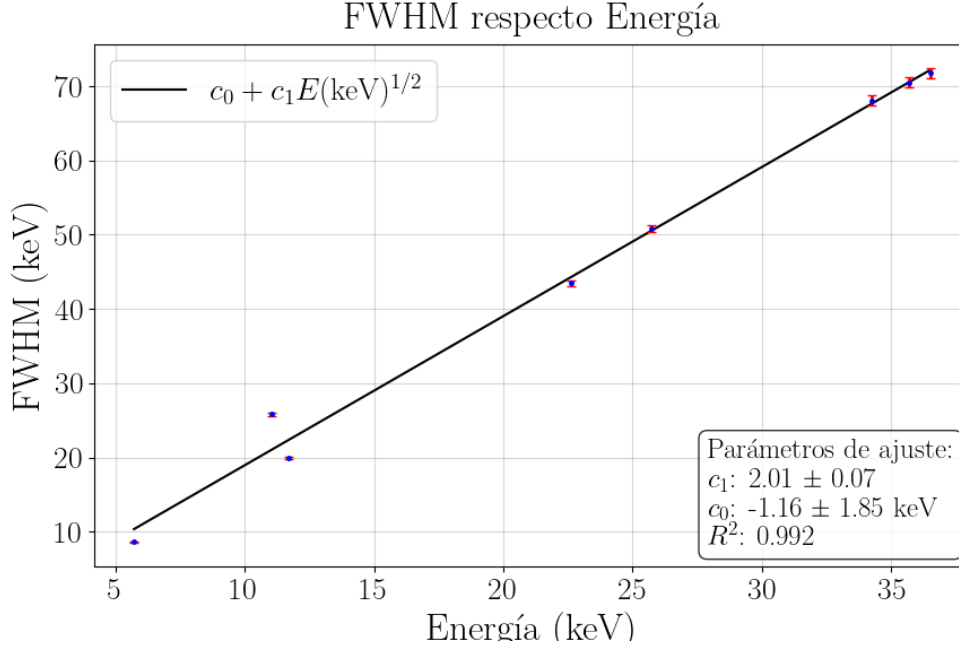


Figura 12: Energías comparadas con el FWHM en un ajuste lineal pretendido.

Para realizar el ajuste en ambos ejes de FWHM como función de la energía, se usa la información encontrada en la calibración en energía (véase tab. 3 resumidos), donde se toma la información de la FWHM(keV) y FWHM(canales), para poder obtener la gráfica 12

Para hacer el ajuste a la función se utilizó la ecu. 4.1, la cual determina que la relación es linealizada para $E^{0.5}(\text{keV})$, dado que la resolución del detector tiende a empeorar con la energía en ese factor potencial, en este caso para bajas energías se tiene mayor incertidumbre relacionada con la ec. 3.1.

$$FWHM(\text{keV}) = c_0 + c_1 \sqrt{E(\text{keV})} \quad (4.1)$$

Realizando un análisis dimensional a la ecu. 4.1, se pueden determinar las unidades de c_0 y c_1 , como se muestra en el siguiente procedimiento:

$$\begin{aligned} FWHM &= c_0 + c_1 \sqrt{E} \\ [\text{Energía}] &= [c_0] + [c_1] \sqrt{[\text{Energía}]} \\ [\text{Energía}] &= [\text{Energía}] + \sqrt{[\text{Energía}]} \sqrt{[\text{Energía}]} \\ [\text{Energía}] &= [\text{Energía}] + [\text{Energía}] \\ [\text{Energía}] &= [\text{Energía}] \end{aligned}$$

Lo que demuestra que c_0 debe tener unidades de [keV] y c_1 de $\sqrt{[\text{keV}]}$ para que la ecuación

sea dimensionalmente correcta. Los valores de las constantes dadas por la fig. 12 se indican a continuación en tab. 4

c_0 (keV)	c_1
-1.2 ± 1.8	2.01 ± 0.07

Tabla 4: Parámetros de relación potencial del FWHM respecto la energía de cada pico E_i , con c_1 adimensional y c_0 (keV).

5. Ajuste picos ^{57}Co

El pico de más baja energía en el espectro no corresponde al pico más intenso, este pico se asocia con un fenómeno conocido como *escape peak*, que ocurre cuando un fotón interactúa parcialmente con el gas de relleno y sale del detector sin haber entregado su energía completa.

En el isótopo ^{57}Co , ocurre con la interacción del material NaI por efecto fotoeléctrico, donde la fotoemisión escapa del detector y se tiene un corrimiento de 122 keV a el detectado 102(8) keV, además de una actividad mucho menor.

Por otro lado, el pico de mayor intensidad observado en el espectro se corresponde con un doblete de picos en el rango de 122-136 keV, que es una característica conocida de las transiciones gamma de ^{57}Co al sumarse las transiciones de los que no interactúan en el pico de escape con los de la transición siguiente.

Para un ajuste más preciso del espectro, se realizó un ajuste a tres componentes gaussianas, lo que permitió modelar los tres picos principales observados. El primer pico, relacionado con el *escape peak*, se encuentra a una energía más baja, mientras que los dos picos principales de mayor intensidad corresponden a las transiciones gamma de 122 keV y 136 keV, los cuales forman el doblete mencionado como se ve en la figura 13.

Debido a este doblete, con el detector actual no es posible diferenciar la radiación característica del isótopo en cuestión, luego se requiere una resolución mayor con un detector típicamente de HPGe, como en la práctica posterior.

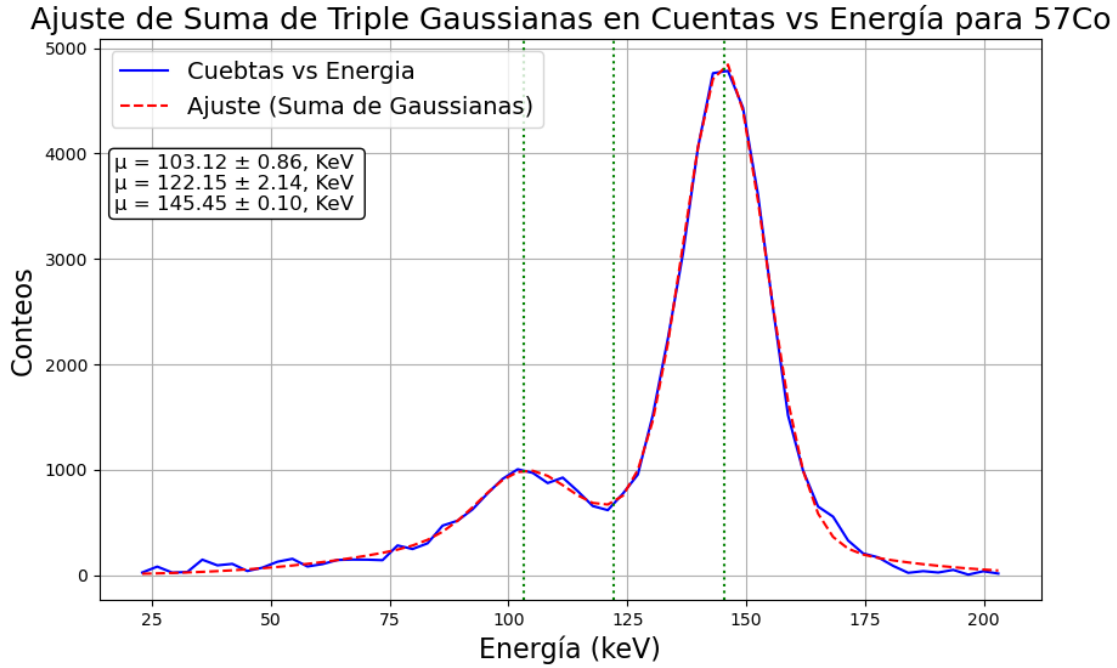


Figura 13: Cuentas Vs Energía para ^{57}Co distinguiendo los picos característicos

Como se observa en la tabla 5, los errores en los centroides están dentro de un rango aceptable para considerar la existencia de una suma de picos, ya que la distancia entre los picos propuesto se encuentra dentro del umbral de resolución del instrumento (3.16 KeV/canal). Este análisis demuestra que, aunque el ajuste de triple gaussiana no permite distinguir completamente los picos de la doble superposición, la aproximación es consistente con las expectativas teóricas y experimentales.

Pico	Centroid Ajustado (keV)	Centroid Reportado (keV)	Error %
Pico 1	103.12	119.12	13.4
Pico 2	122.15	122.37	0.17
Pico 3	145.45	136.61	6.47

Tabla 5: Comparativa de centroides entre los valores ajustados y los reportados.

6. Calibración en eficiencia

Para la calibración en eficiencia se utilizaron los datos de las tablas C.1 y C.2 de [2] y la ecu. 6.1 para luego ser reemplazada la información en la ecu. 6.2 y así obtener la eficiencia ϵ .

$$A_{\gamma}(\text{kBq}) = A_0(\text{kBq}) \exp^{-(t(a)-t_0(a))/\tau(a)} \quad (6.1)$$

donde A_{γ} y A_0 es la actividad, los t tiempo actual en años, t_0 tiempo de la actividad inicial en años, al igual que τ el tiempo de semi-vida.

$$\epsilon(\%) = \frac{I_{\gamma}(\text{conteos})}{A(\text{kBq})b_{\gamma}} \quad (6.2)$$

donde A es la actividad final, I_γ es la intensidad y b_γ es el porcentaje en que se deriva el decaimiento de la actividad a ese específico nivel de energía. Las unidades resultantes por tanto son kBq/conteos, que no nos dice mucho si no hay una comparación estandarizada de estas medidas.

E_γ [keV]	I_γ [cuentas]	A^a [kBq]	b_γ	A_γ [kBq]	ϵ [%]
122.1	5462	40.7	85.6	4.07E-06	2990
136.5	29188	40.7	10.68	4.07E-06	1280
661.7	183049	37.0	85.1	25.0	1.27
1173.2	28001	34.8	99.857	3.75	0.628
1274.5	4936	31.9	99.935	3.59E-01	0.579
1332.5	25969	34.8	99.983	3.75E+00	0.582

Tabla 6: Preparación para la calibración en eficiencia.

A pesar de que las eficiencias son muy inexactas en elementos que no deberían presentar la actividad esperada, en los demás casos los valores de eficiencia son aceptables, considerando un límite superior del 100 %. Esto sugiere que el principal problema radica en la actividad calculada, que puede diferir en la muestra y el algún comportamiento que no se puede describir con exactitud, incluso después de aproximadamente 12 años.

También se deben ver que otros posibles factores podrían haber interferido en la muestra para que los valores de ^{57}Co pudieran tener tan altos valores sabiendo el tiempo transcurrido, se sospecha que pueda no ser de esta época o que la actividad presentada como este conteo pueda ser una medición errónea puesto el problema de tomar la medición tan imprecisa con el centelleador NaI.

7. Normalización

Se aplicó la normalización basados en el valor máximo de actividad $A_{max} = 6.71 \times 10^8$ [conteos/kBq]. A partir de la gráfica 14, no se aprecia un comportamiento regular ni una forma clara para comprender la eficiencia respecto la energía.

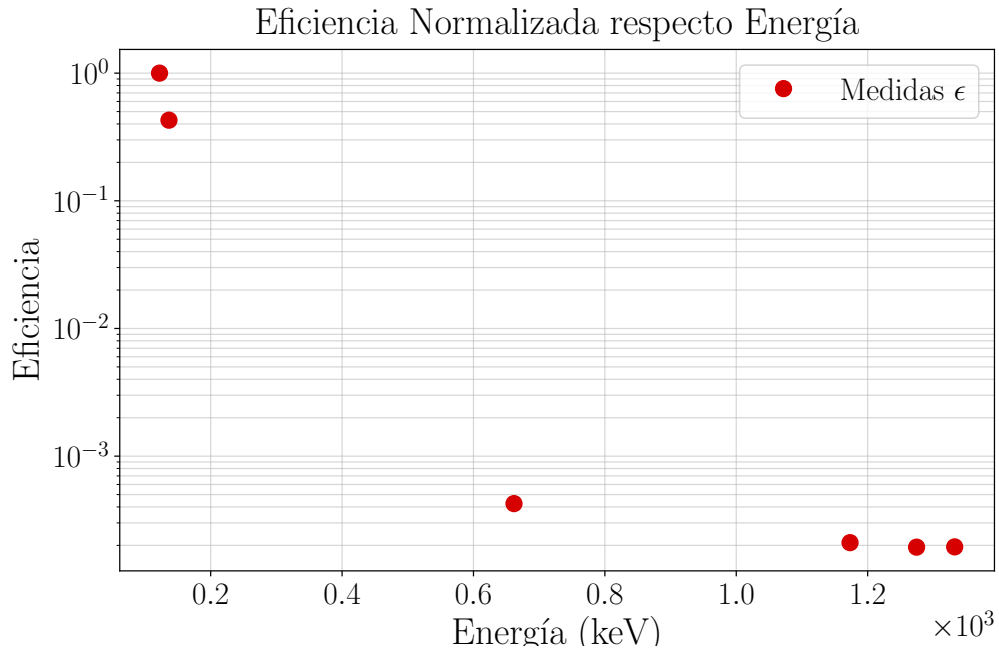


Figura 14: Comportamiento de la eficiencia normalizada a 1 (adimensional) respecto a las energías de cada pico.

A pesar de que los valores posteriores a ~ 500 keV fueron más consistentes en el orden que manejaban, la descripción con respecto a la energía tampoco es factible en términos de un comportamiento conocido polinómico regular.

Referencias

- [1] M.-M. Bé, V. Chisté, C. Dulieu, E. Browne, C. Baglin, V. Chechev, N. Kuzmenko, R. Helmer, F. Kondev, D. MacMahon, and K. Lee, *Table of Radionuclides*, vol. 3 of *Monographie BIPM-5*. Pavillon de Breteuil, F-92310 Sèvres, France: Bureau International des Poids et Mesures, 2006.
- [2] F. C. Mejía, "Instrumentación nuclear. prácticas experimentales," 1 2025.