



Practica 2: Calibración de un detector centellador

Escobar , Santiago¹; Cortes, Sebastian²; Barbosa Rafael³

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogota, Colombia
10 de Febrero del 2025

57/60

1. Introducción

El propósito de esta práctica es caracterizar el desempeño de un detector de yoduro de sodio (NaI) frente a la radiación gamma, enfocándonos en tres aspectos clave:

1. **Calibración en energía:** Determinar la relación entre el número de canal (asignado por el Analizador Multicanal) y la energía real de los fotones γ .
2. **Resolución poder de separación de picos:** Cuantificar la anchura de los picos ($FWHM$) y examinar en qué medida el NaI puede discriminar entre líneas de energía muy cercanas (por ejemplo, las de ^{57}Co a 122 y 136 keV).
3. **Eficiencia en función de la energía:** Hallar la probabilidad de detección relativa en distintos rangos de keV, comparando el número de cuentas detectadas con la actividad y la intensidad de emisión de la fuente.

Para ello, se medirán los espectros de distintas fuentes radiactivas que presentan líneas gamma bien conocidas (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{22}Na y ^{57}Co), junto con el fondo radiactivo ambiental. Una vez recolectados los datos, se sustrae el fondo y se ajustan gaussianas sobre los picos de interés para extraer centroides, anchura a mitad de altura ($FWHM$) e intensidades. Mediante la comparación con datos bibliográficos (energía y ramificación de emisión), se construirá la curva de calibración canal-energía y se analizará la resolución y la eficiencia del detector a diferentes energías.

En las secciones siguientes se detalla el procedimiento experimental y el análisis requerido para cumplir estos objetivos.

2. Procedimiento

2.1. Montaje experimental y adquisición de espectros

Para llevar a cabo la práctica se emplea un detector de NaI, acoplado a un fotomultiplicador (PMT). Este PMT se polariza con alto voltaje y, a su salida, la señal pasa a un preamplificador y amplificador, cuya salida se conecta a un conversor analógico-digital (ADC) y finalmente al analizador multicanal (MCA). Se recomienda alinear cuidadosamente cada fuente sobre la cara frontal del cristal, de modo que el eje de la fuente coincida con el eje del detector. Se miden los espectros del ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs y ^{57}Co y se registra también un espectro de fondo, sin fuente presente, a fin de sustraerlo posteriormente.

La Tabla 1 muestra los nombres de archivo (.dat) y los tiempos de adquisición (Δt) para cada medición:

Tabla 1. *Tiempos de adquisición y nombres de archivo .dat para cada fuente y para los espectros de fondo (en dos duraciones distintas).*

Fuente	Δt (s)	Archivo
^{22}Na	600	NaI_22Na_600s.dat
^{60}Co	600	NaI_60Co_600s.dat
^{137}Cs	600	NaI_137Cs_600s.dat
Fondo	600	NaI_Fondo_600s.dat
^{57}Co	300	NaI_57Co_300s.dat
Fondo	300	NaI_Fondo_300s.dat

2.2. Procesamiento de los datos

1. **Visualización de espectros:** Se grafica el contenido de cada archivo .dat, observando los picos principales.
2. **Sustracción de fondo:** Para cada fuente, se resta el espectro de fondo medido con el mismo tiempo de adquisición, eliminando así cuentas ajenas a la fuente.
3. **Identificación de picos:** Para ubicar los picos gamma de cada radionúclido, se emplean datos bibliográficos de energía, fracción de emisión (b_γ) y actividad. La Tabla 2 muestra la información relevante de los isótopos empleados en esta práctica. Con base en estos valores, se ajustan gaussianas alrededor de cada línea identificada para determinar de manera precisa el centroide (canal), la anchura (FWHM) y el área del pico.

Tabla 2. *Resumen de los núclidos empleados en la práctica, incluyendo vida media ($T_{1/2}$), energía de emisión E_γ , intensidades de emisión b_γ , actividad y fecha de calibración. Los valores se basan en Ref. Firestone y (Eds.), 1996 y en registros de laboratorio.*

Núclido	$T_{1/2}$	E_γ (keV)	b_γ (%)	Actividad (kBq)	Fecha
^{22}Na	2.6019 y	1274.537(7)	99.935(15)	31.9	06-07-2006
^{57}Co	271.79 d	122.06065(12) 136.47350(29)	85.60(17) 10.68(8)	40.7	05-03-2018
^{60}Co	5.2714 y	1173.228(3) 1332.490(6)	99.857(22) 99.983(6)	34.8	08-06-2006
^{137}Cs	30.07 y	661.657(3)	85.1(2)	35.1	18-05-2006

4. **Ajuste de picos:** Se elige una ventana para cada pico y se ajusta una función:

$$f(x) = \text{fondo lineal} + \text{gaussiana}$$

Esto no es una función. Son nombres q

Obteniendo el centroide (canales), el área (cuentas) y la anchura ($FWHM$) de cada pico.

2.3. Calibración canal-energía y resolución

Tras localizar los picos experimentales y sus centroides (en canales), se asocia cada uno con su energía bibliográfica E_γ . Se hace un ajuste lineal:

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

De este modo, se obtiene la calibración canal-energía. Posteriormente, con la anchura en canales ($FWHM_{\text{canal}}$), se calcula $FWHM_{\text{keV}} = FWHM_{\text{canal}} \times a_1$. Graficando $FWHM_{\text{keV}}$ vs. E_γ , se discute la resolución realizando nuevamente un ajuste lineal.

$$FWHM(\text{keV}) = c_0 + c_1 \sqrt{E_\gamma(\text{keV})}$$

En particular, se investiga si los picos de 122 keV y 136 keV de ^{57}Co se resuelven o se observan como un único pico, analizando así la limitación de resolución del NaI.

2.4. Análisis de eficiencia

Con el área del pico $I(E_\gamma)$ (número de cuentas) y la actividad conocida de la fuente (corrigiendo por la probabilidad de emisión $b(E_\gamma)$), se calcula la eficiencia:

$$\varepsilon(E_\gamma) = \frac{I(E_\gamma)}{N_0(E_\gamma)}$$

donde:

$$N_0(E_\gamma) = A \cdot b_\gamma \cdot \Delta t$$

si A es la actividad en fotones y Δt es el tiempo de medida. De esta forma, se construye la curva de ε en función de E_γ . Nótese que se debe hacer un ajuste de la actividad actual según el tiempo transcurrido desde la fecha de certificado de calibración usando la siguiente ecuación.

$$A(Z, N; t) = A_0 e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}} \quad (1)$$

donde $A(Z, N; t)$ es la actividad del núcleo en el instante t , A_0 es la actividad inicial en el instante de calibración t_0 , y τ es la constante de decaimiento del isótopo.

3. Análisis

3.1. Presentación de Resultados

Como podemos observar en la Figura 1, se muestran las curvas registradas para cada fuente, incluyendo los espectros de fondo medidos en dos tiempos de adquisición (5 y 10 minutos). Se observa que, en la región de canales por debajo de aproximadamente 160, el fondo posee una intensidad elevada, lo cual dificulta un análisis confiable de los espectros en esa zona.

En vista de lo anterior, la Figura 2 exhibe los mismos datos pero tras sustraer el correspondiente fondo, resaltando así el *espectro real* de cada fuente. Esto permite discriminar con mayor claridad los picos relevantes, donde el más intenso es el de ^{137}Cs (662 keV) y el menos intenso corresponde a 1274 keV de ^{22}Na .

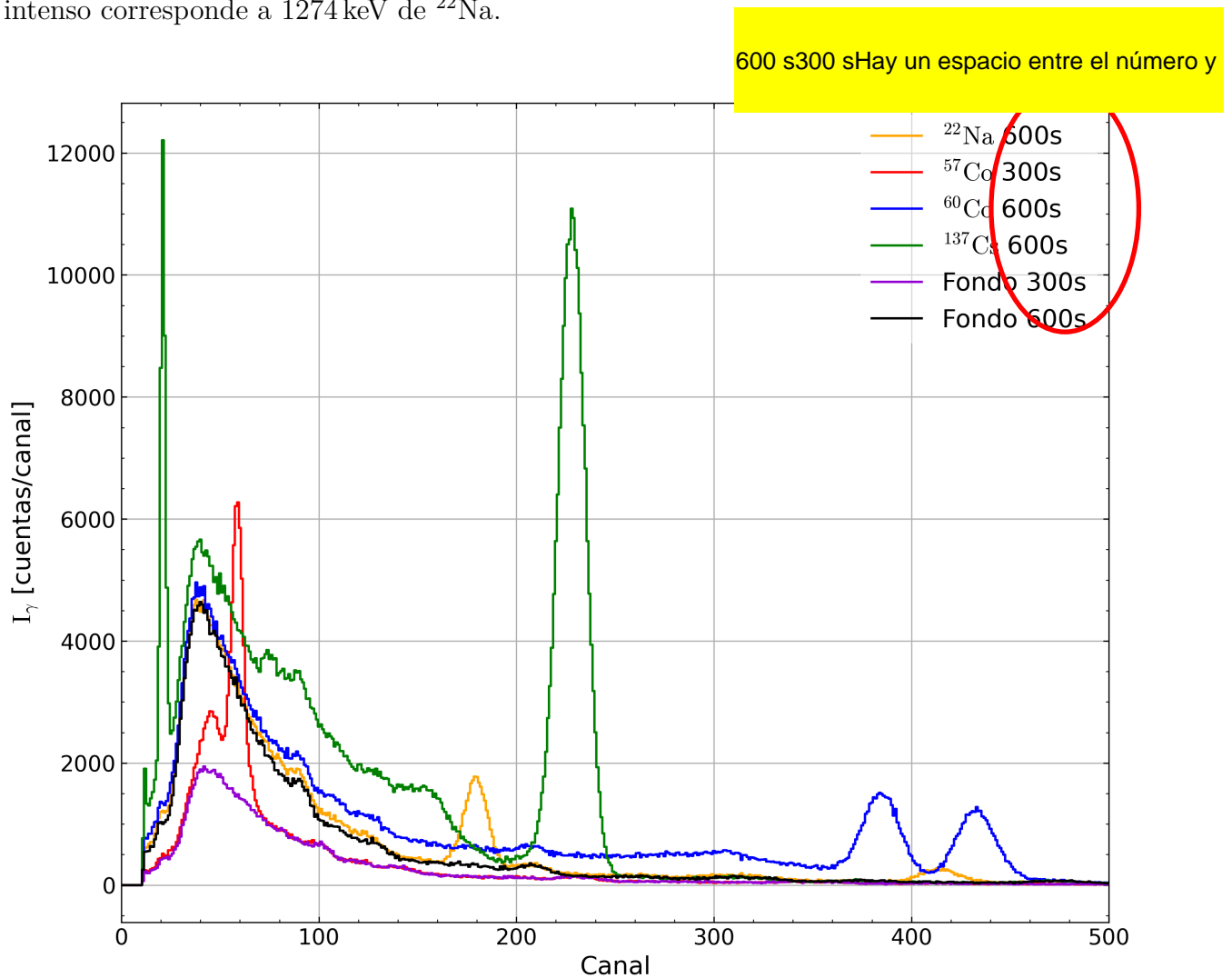


Figura 1. Espectros para las muestras y fondo.

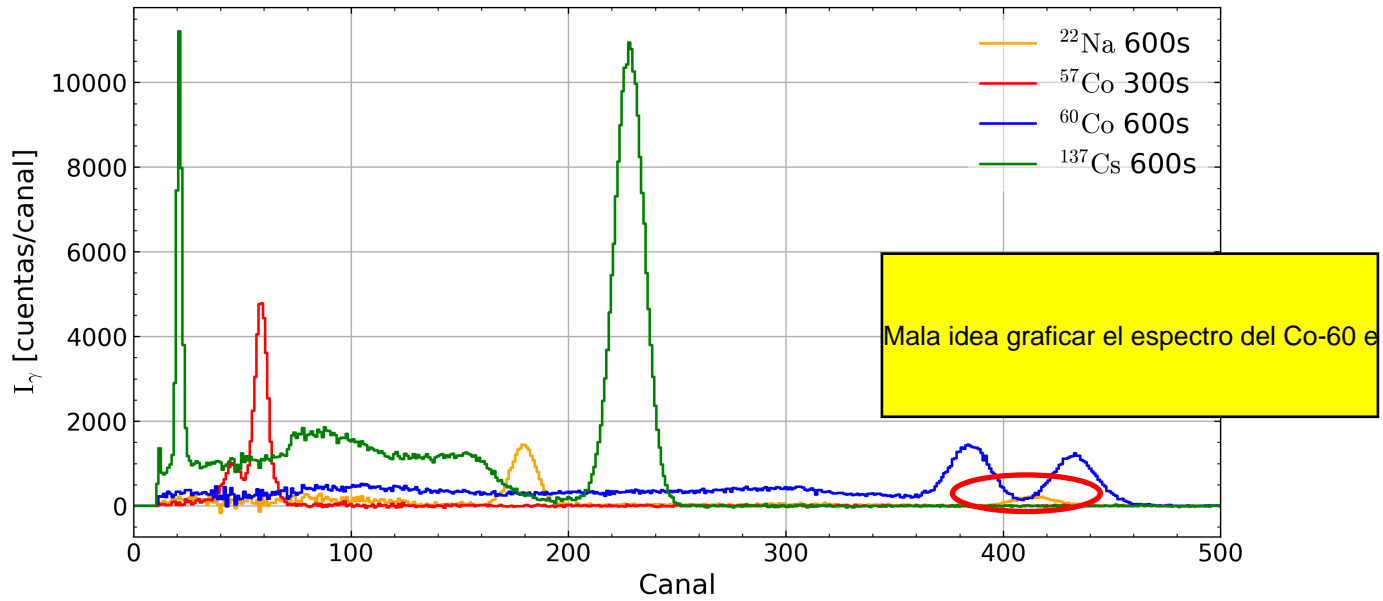


Figura 2. Espectros para las muestras mediante la resta del fondo.

Por último, dado que la medición de ^{57}Co se realizó con un tiempo de adquisición diferente (5 minutos en lugar de 10), se presenta de manera individual en la Figura 3, donde es posible apreciar con mayor detalle el comportamiento espectral específico de esta fuente. De manera similar se muestran los espectros de manera individual con y sin el fondo en las Figuras 4 a 6 para las muestras con tiempo de 10 minutos.

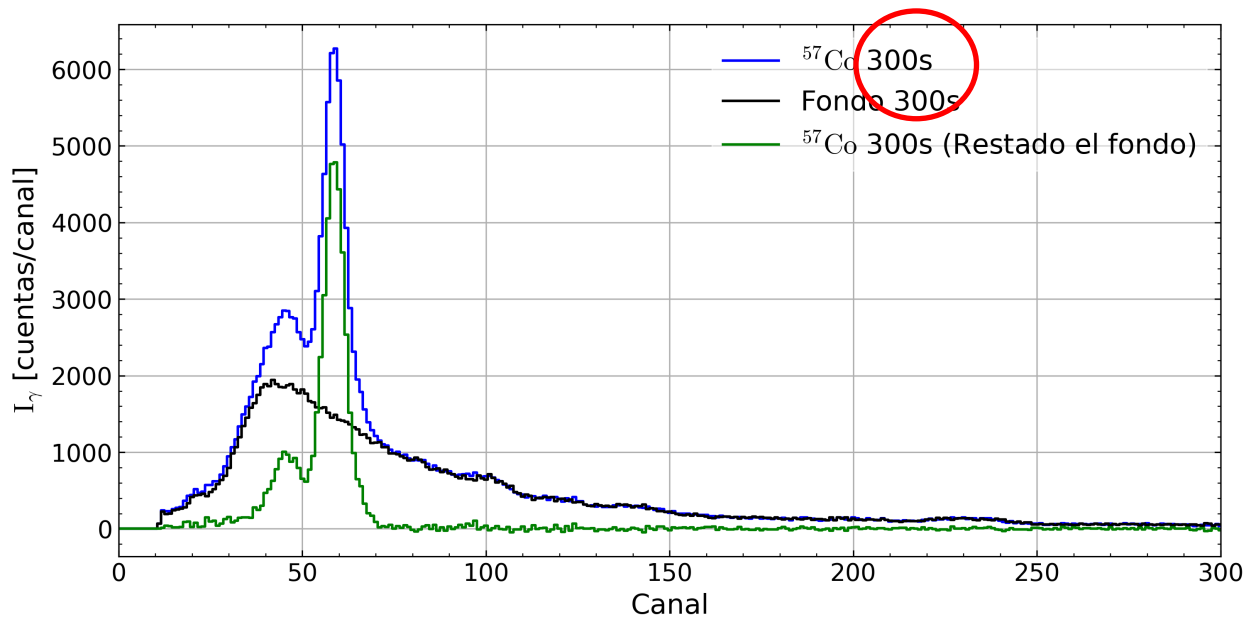


Figura 3. Espectros para la muestra de ^{57}Co , fondo y la muestra después de restar el fondo.

Formato aceptado: ^{60}Co

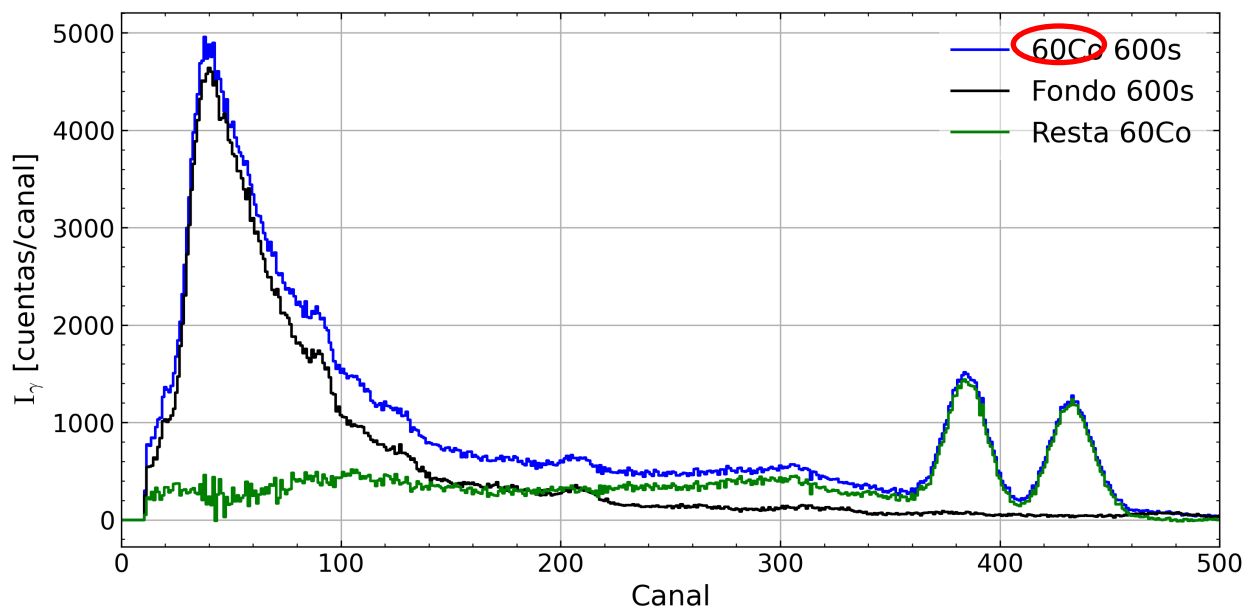


Figura 4. Espectros para la muestra de ^{60}Co , fondo y la muestra después de restar el fondo.

Formato aceptado: ^{22}Na

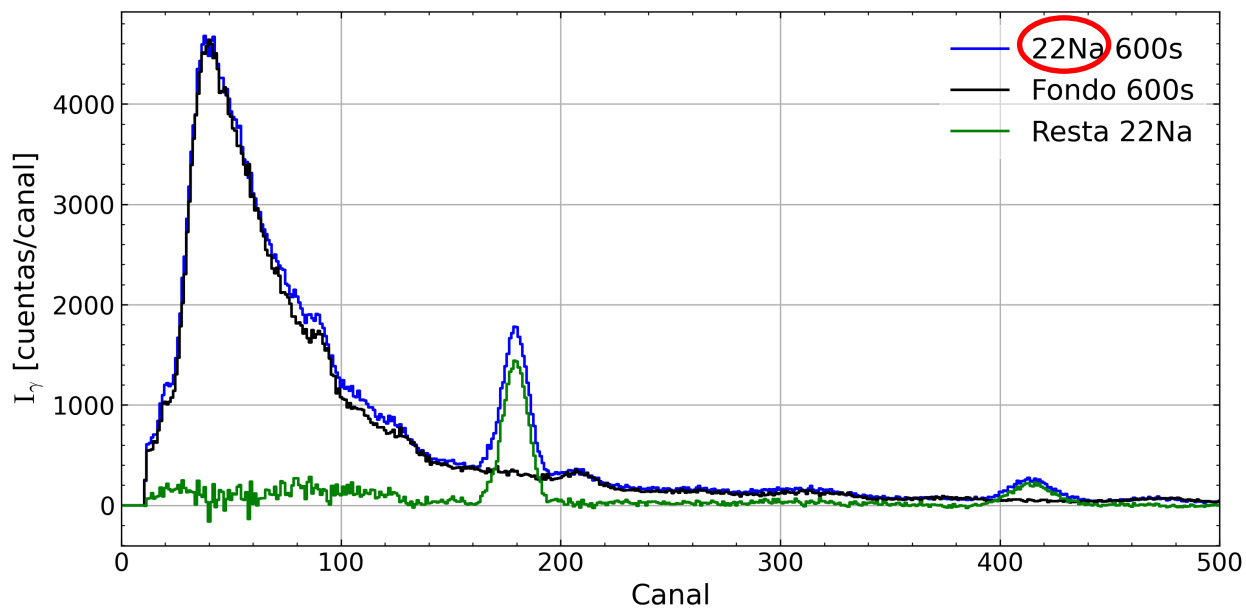


Figura 5. Espectros para la muestra de ^{22}Na , fondo y la muestra después de restar el fondo.

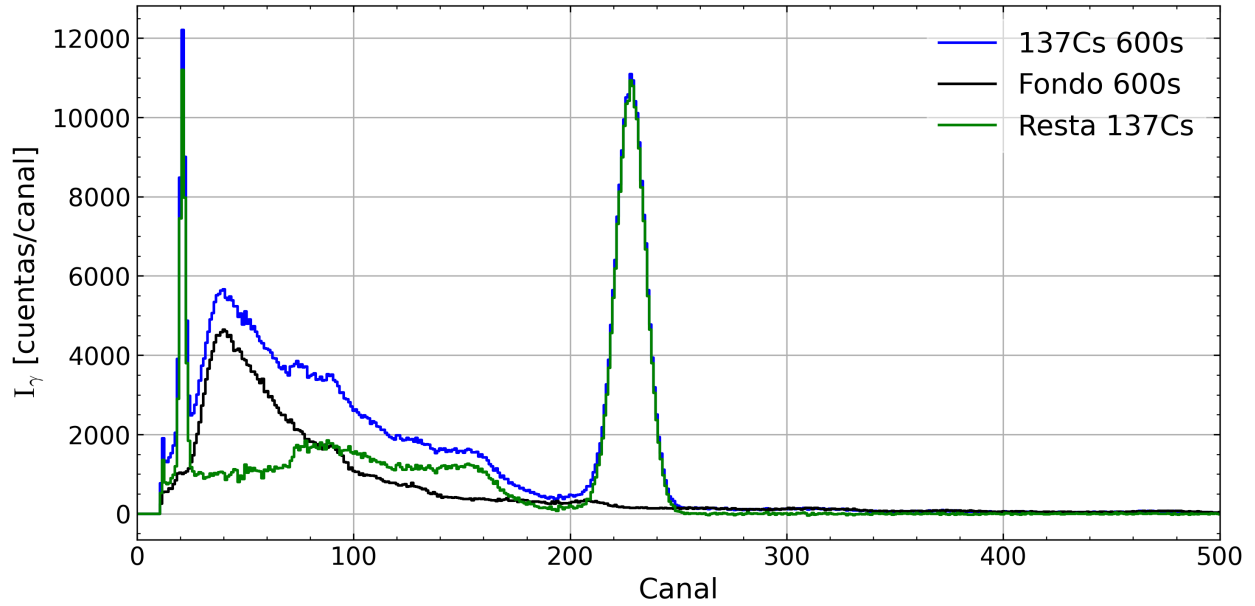


Figura 6. Espectros para la muestra de ^{137}Cs , fondo y la muestra después de restar el fondo.

3.2. Análisis puntual de cada pico

En esta sección se realiza un ajuste estadístico *por separado* a cada pico gamma de las fuentes estudiadas. Para ello, se define una ventana alrededor de cada máximo de interés y se aplica un modelo de *fondo lineal más gaussiana*. A partir de este ajuste, se extraen el centroide (canal), la anchura (*FWHM*) y el área (número de cuentas), lo que permite cuantificar de manera precisa la energía, resolución y la intensidad de cada línea.

Para el ^{57}Co , el ajuste se realiza mediante la suma de tres curvas gaussianas: una para el pico de escape (entre los canales 30 y 50) y dos para el doblete generado por la emisión gamma (entre los canales 50 y 75). En el caso del ^{60}Co , debido a la proximidad de sus picos, se emplea un ajuste basado en la contribución de dos gaussianas sobre un mismo fondo. Finalmente, en el ^{137}Cs , se considera la suma de dos gaussianas para modelar los picos generados por los rayos X $K\alpha$ y $K\beta$, producto de la conversión interna.

Las Figuras 7 a 10 muestran el ajuste en cada caso y la Tabla 3 resume todos los valores necesarios para el ajuste.

Si escriben cosas tan complicada como la suma de gaussianas y recta, por qué no

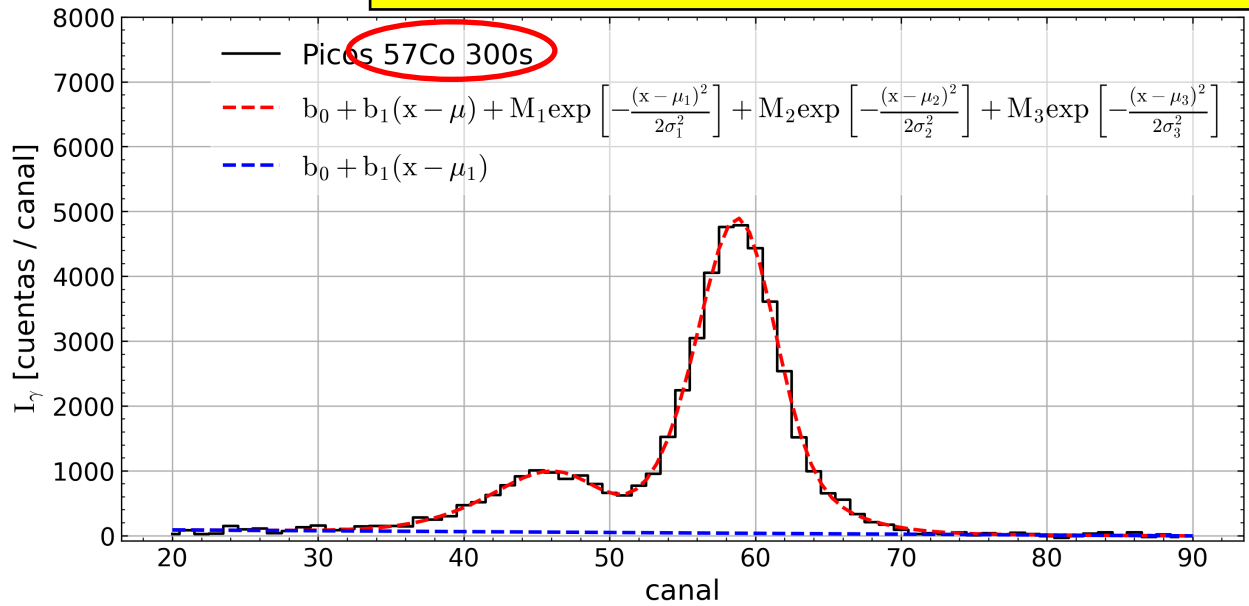


Figura 7. Ajuste a los fotopicos del ^{57}Co 300s.

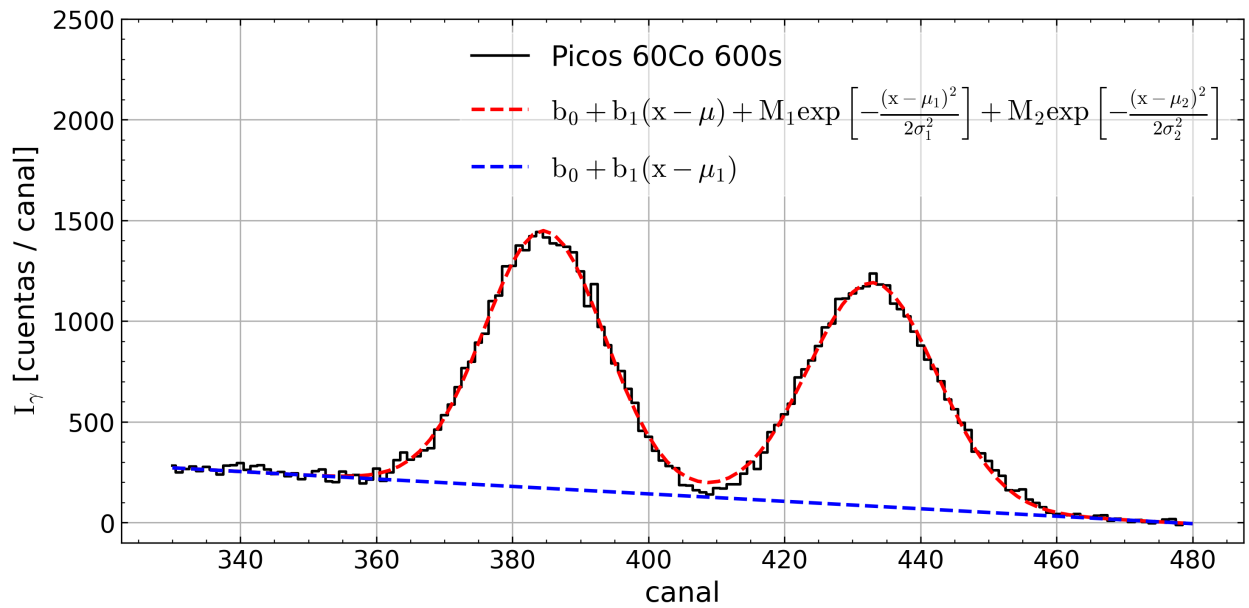


Figura 8. Ajuste a los fotopicos del ^{60}Co 600s.

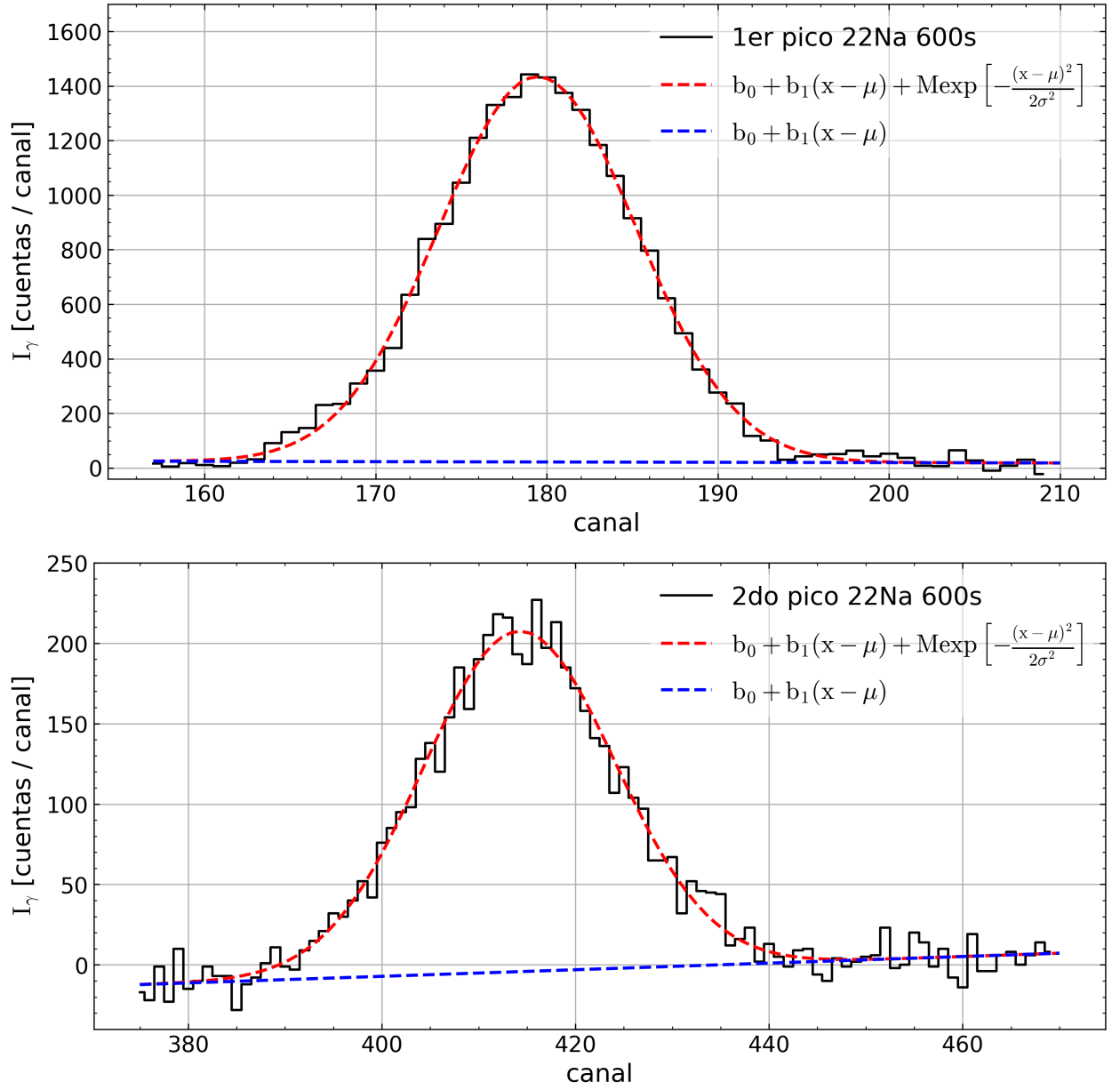


Figura 9. Ajuste a los fotopicos del ^{22}Na 600s.

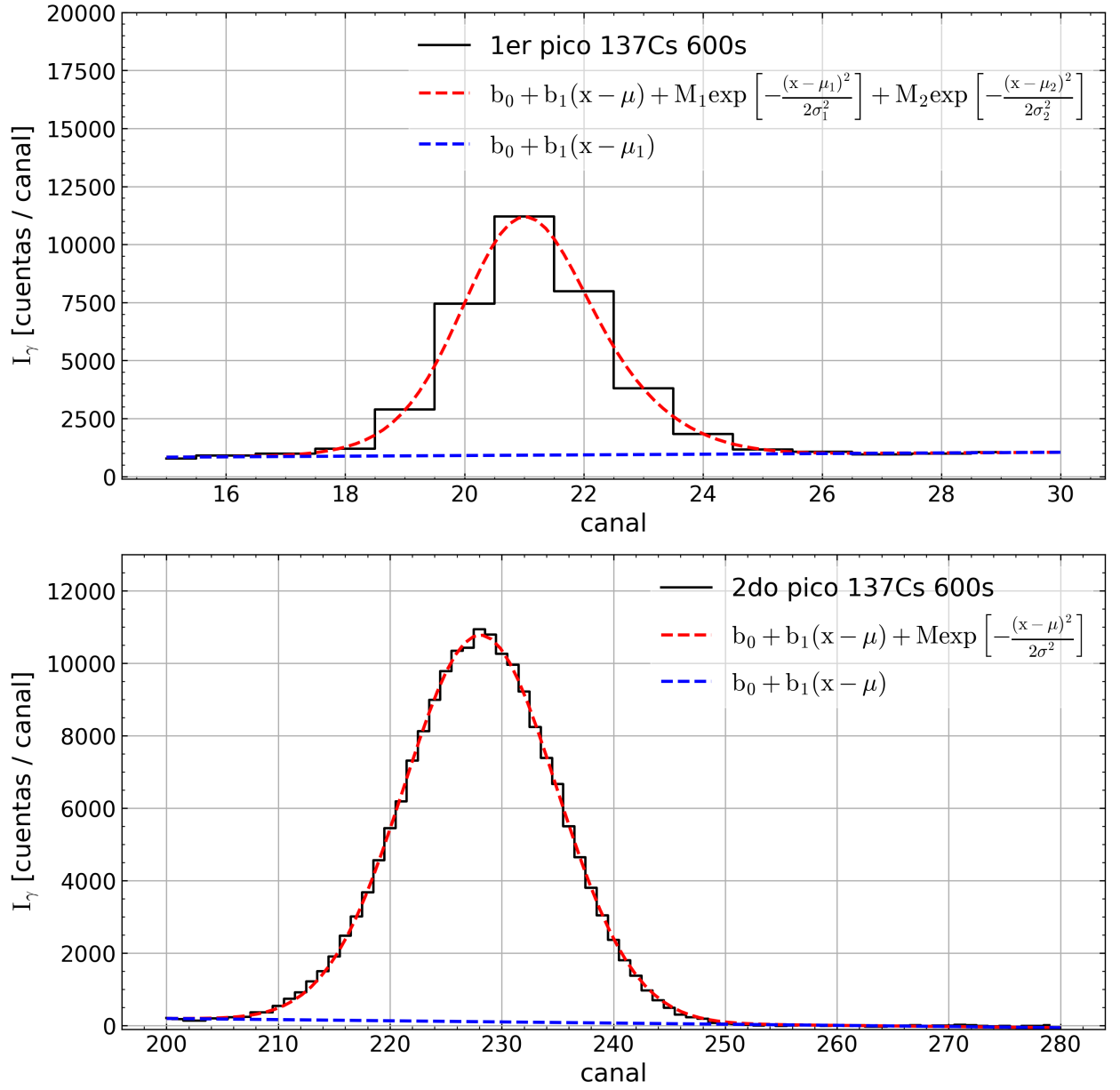


Figura 10. Ajuste a los fotopicos del ^{137}Cs 600s.

Tabla 3. Dato de ajuste para los picos de diferentes isótopos.

Fotopico		M cuerdas	μ canal	σ canales	FWHM canales	Intensidad cuentas
^{22}Na 600s	1er pico	1412(12)	179.47(5)	5.77(6)	13.60(15)	20436(282)
	2do pico	212(3)	414.17(18)	9.92(21)	23.37(49)	5264(138)
^{57}Co 300s	Escape	877(35)	45.68(20)	4.31(23)	10.15(55)	9583(700)
	1er pico	4475(41)	58.56(3)	2.89(3)	6.80(8)	32418(1335)
	2do pico	534(34)	61.83(10)	3.12(7)	7.35(9)	4176(402)
^{137}Cs 600s	$K\alpha$	5627(887)	20.92(3)	0.91(4)	2.14(11)	12844(2121)
	$K\beta$	4772(892)	21.31(6)	1.46(6)	3.43(15)	17418(3347)
	2do pico	10670(26)	228.09(2)	6.83(2)	16.09(5)	182714(715)
Picos ^{60}Co 600s	1er pico	1278(10)	384.68(7)	8.84(8)	20.81(19)	28315(334)
	2do pico	1110(9)	432.98(9)	9.44(10)	22.23(24)	26255(358)

En la Figura 7 se muestra el espectro del ^{57}Co , donde se aprecian *dos* picos claramente visibles en una misma región de canales, mientras que un tercer pico queda visualmente sobrepuesto y no se distingue a simple vista. Teóricamente, este tercer pico corresponde ya sea a la línea de 136 keV mientras el primero es el pico de escape (en torno a 94 keV), que se forma cuando un rayo X característico del yodo (28–33 keV) escapa del cristal. Al intentar modelar estos datos únicamente con dos gaussianas, el ajuste estadístico resulta deficiente, lo que confirma la necesidad de *tres* gaussianas superpuestas. Una asociada al pico de escape (aprox. 94 keV), Otra correspondiente a la línea de 122 keV y la última para la línea de 136 keV.

Tal como se detalla en la Tabla 5, los centroides finales se ubican en torno a 45.68, 58.56 y 61.83 canales, y su inclusión conjunta mejora notablemente la calidad del ajuste. En contraste, otros isótopos (p. ej. ^{137}Cs , ^{22}Na o ^{60}Co) presentan fotopicos más espaciados y requieren sólo una o dos gaussianas sin una superposición tan marcada. Así, el caso de ^{57}Co en NaI(Tl) por la proximidad de sus líneas (14 keV de diferencia) y la presencia del pico de escape, dando lugar a la necesidad de un ajuste con tres componentes y a la necesidad de un detector con mayor resolución para poder observarlos detalladamente.

3.3. Calibración del detector

A continuación, se llevó a cabo la *calibración de energía vs. canal* usando los centroides experimentales de cada fotopico conocido. El ajuste lineal adoptado,

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

proporcionó un excelente grado de concordancia con los datos, tal como se aprecia en la Figura 11, evidenciando un comportamiento lineal según las constantes de ajuste mostrados en la Tabla 4. La Tabla 5 resume los parámetros a_0 y a_1 obtenidos, junto con sus incertidumbres, reflejando la consistencia de la calibración a lo largo del rango de energías analizado.

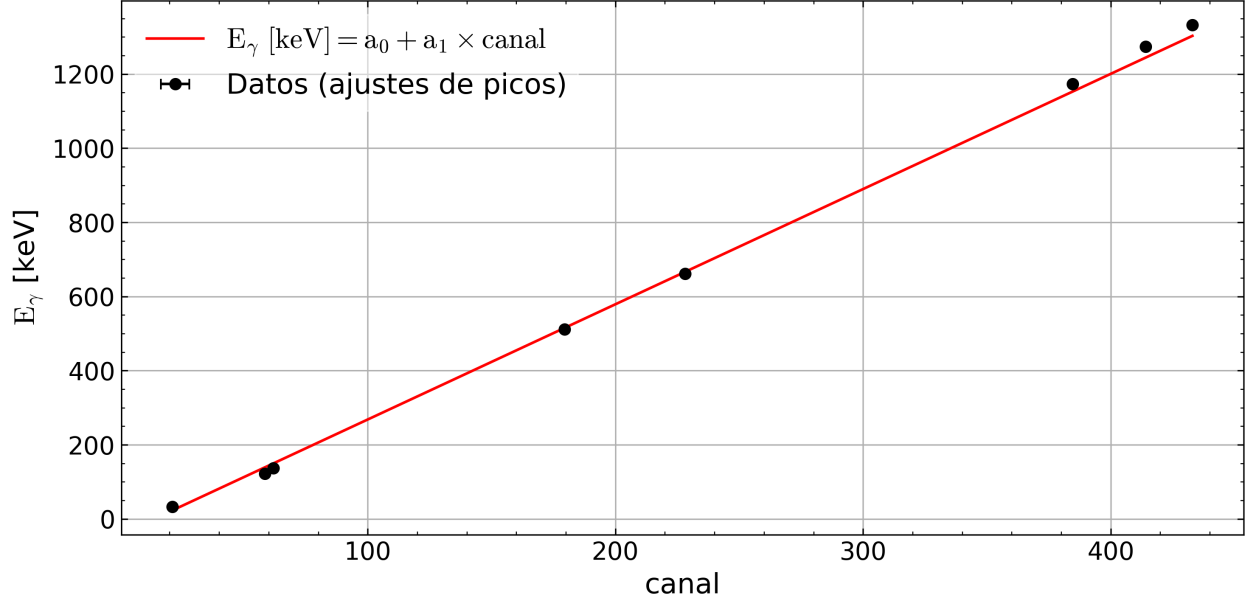


Figura 11. Ajuste para la calibración de canal a E_γ

Tabla 4. Constantes relacionadas al ajuste de la Figura 11.

a_0 [keV]	a_1 [keV/canal]
-42.61(2)	3.1077(1)

Tabla 5. Valores relacionados a la calibración del detector.

E_γ [keV]	Canal	E_γ ajuste [keV]	ΔE_γ [keV]	$\frac{\Delta E_\gamma}{E_\gamma}$ [%]	FWHM [keV]
32.8*	21.14(2)	26.99(2)	5.81(2)	17.72(6)	5.57(19)
122.1	58.26(20)	140.06(2)	17.96(2)	14.71(2)	21.12(34)
136.5	61.23(3)	149.27(2)	12.77(2)	9.35(1)	22.79(25)
511.0	179.47(5)	516.94(3)	5.94(3)	1.16(1)	42.07(46)
661.7	228.09(2)	667.33(3)	5.63(3)	0.85(1)	49.77(15)
1173.2	384.68(7)	1151.72(5)	21.48(5)	1.83(1)	64.37(59)
1274.5	414.17(18)	1242.94(5)	31.56(6)	2.48(2)	72.29(152)
1332.5	432.98(9)	1301.12(5)	31.38(5)	2.35(2)	68.76(74)

* Los valores dados para este pico provienen de un ajuste de dos curvas gaussianas, por tanto los valores asociados al canal y El FWHM vienen del promedio con peso en su intensidad como se muestra en la guía [Cristancho, 2025]. La Intensidad se toman como la suma de cada pico.

La Figura 12 muestra la dependencia de la anchura de los picos ($FWHM$) con la energía E_γ . El ajuste realizado (con la forma $FWHM(E_\gamma) = c_0 + c_1\sqrt{E_\gamma}$) evidencia que la resolución del detector empeora ($FWHM$ mayor) conforme aumenta la energía, en coherencia con el

comportamiento usual de los centelladores de NaI(Tl). Los parámetros del ajuste (Tabla 6) describen cuantitativamente cuánto crece la anchura por cada raíz de (E_γ) [keV].

En relación con la detección de líneas cercanas, como las del ^{57}Co (122 keV y 136 keV), se necesitaría una *resolución* lo bastante fina para que las *FWHM* a ~ 130 keV fueran significativamente menores que 14 keV. Sin embargo, tal como muestran los valores de c_0 y c_1 en el NaI(Tl) analizado, la *FWHM* supera varios keV incluso en energías bajas, de manera que estas dos líneas terminan superponiéndose en gran medida. Para resolverlas netamente (con picos distintos), se requeriría un detector cuya *FWHM* en torno a 130 keV estuviera por debajo de, por ejemplo, 6–7 keV, una condición más propia de detectores semiconductores (Ge) que de los centelladores NaI(Tl).

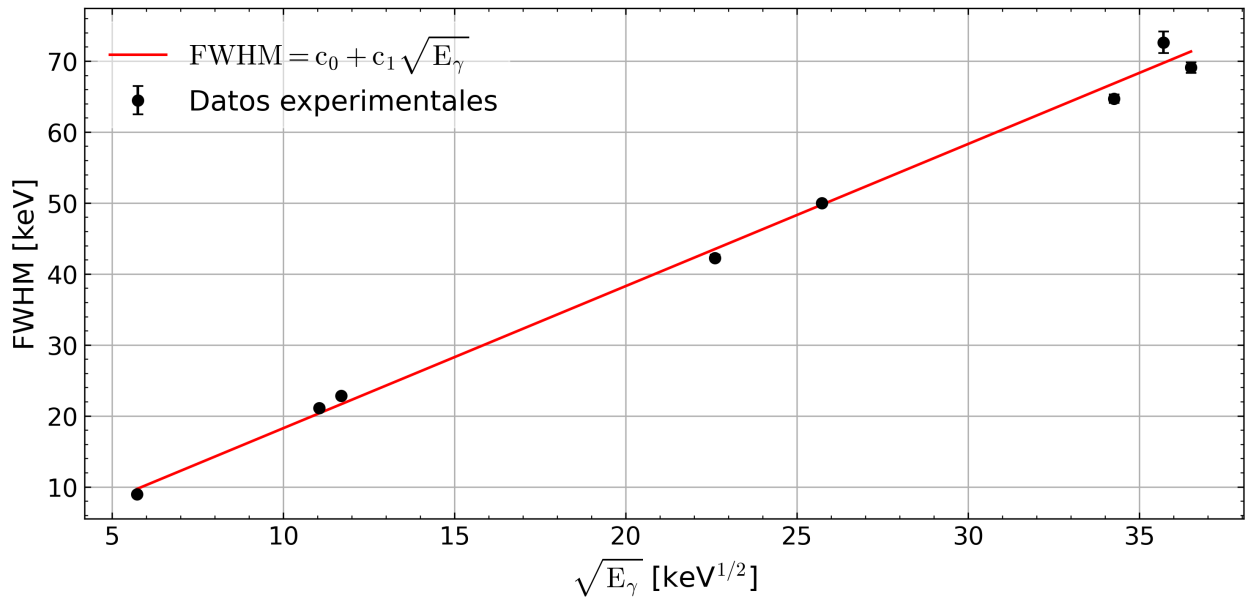


Figura 12. Ajuste para la relación entre el *FWHM* y E_γ

Tabla 6. Constantes relacionadas al ajuste de la Figura 12.

c_0 [keV]	c_1 [keV ^{1/2}]
-2.141(202)	2.018(10)

Sinsentido.-2.1(2) y -2.02(1) es la forma correcta.

En la Figura 13 se presenta la eficiencia de detección normalizada a la unidad, representada en escala semi-logarítmica. Para ello, primero se identificó la eficiencia máxima $\varepsilon_{\text{máx}}$ entre todos los datos calculados. Luego, cada valor ε_i se transformó a $\varepsilon'_i = \varepsilon_i / \varepsilon_{\text{máx}}$ de modo que la eficiencia máxima pasara a ser 1. De manera análoga, si $\sigma(\varepsilon_i)$ era la incertidumbre asociada, la propagación de errores arroja

$$\sigma(\varepsilon'_i) = \frac{1}{\varepsilon_{\text{máx}}} \sigma(\varepsilon_i).$$

Tabla 7. Valores para el calculo de la eficiencia

E_γ [keV]	I_γ [cuentas]	A^a [kBq]	b_γ	A_γ [kBq]	ϵ
32.8	30262(5468)	26.89	80.7*	21.70(1)	697.34(12600)
122.1	32418(1335)	40.70	85.60(17)	34.84(7)	930.50(3836)
136.5	4176(402)	40.70	10.68(8)	4.35(3)	960.71(9276)
661.7	182714(715)	26.89	85.10(20)	22.88(5)	3992.68(1823)
1173.2	28315(334)	7.43	99.86(2)	7.41(1)	1909.40(2253)
1274.5	5264(138)	1.32	99.94(2)	1.31(1)	2000.77(5245)
1332.5	26255(358)	7.43	99.98(1)	7.41(1)	1768.25(2411)

* Se toma el valor asociado al primer pico del ^{57}Co por tener mayor peso.

Con estas eficiencias normalizadas, se observa la variación relativa de la detección a diferentes energías, facilitando la comparación en un diagrama $\log(\epsilon)$ vs. E_γ . En particular, se aprecia que las eficiencias decrecen tanto a energías muy bajas como a energías elevadas, mientras que alcanzan un máximo relativo en la zona intermedia. Esto refleja la forma en que la probabilidad de interacción en el NaI(Tl) cambia con la energía incidente del fotón.

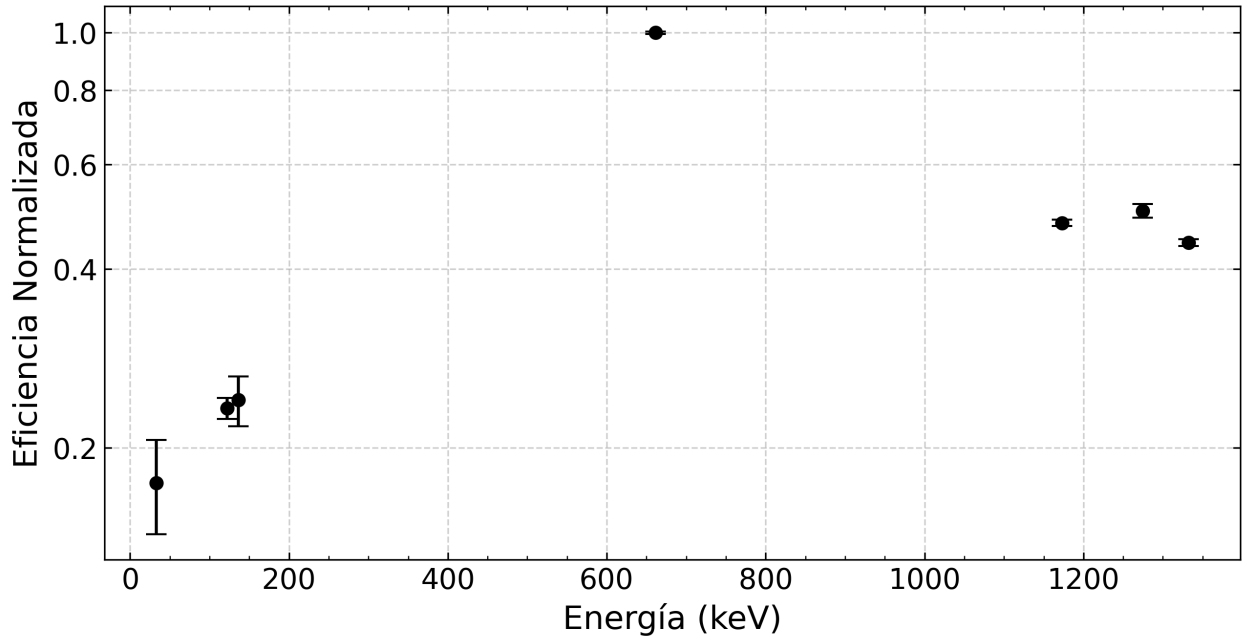


Figura 13. Valores de eficiencia normalizados para diferentes energías.

4. Conclusiones

Los cálculos de eficiencia y el análisis de los fotopicos han demostrado que, aunque contienen información relevante, la manera en que se desarrollan los experimentos, así como las características específicas del detector, juegan un papel fundamental en la cantidad de información y la precisión de los datos obtenidos. La resolución del detector, en particular,

limita la capacidad de discernir claramente las características de los picos, especialmente cuando se trata de muestras con picos cercanos, como en el caso del ^{57}Co y el ^{137}Cs . En estos casos, la definición del detector no es suficiente para una identificación precisa de las características individuales de los picos, lo que puede afectar la exactitud de las mediciones.

Asimismo, el tiempo de desarrollo del experimento es un factor crucial para la obtención de datos más precisos. Un mayor tiempo de adquisición permite realizar mejores ajustes de eficiencia, lo que puede contribuir a la reducción de elementos estadísticos que afectan la calidad de los resultados, como el FWHM y la intensidad de cada pico. De esta manera, se facilita la obtención de una representación más precisa de los fotopicos y, por ende, de las propiedades de las muestras analizadas.

Referencias

- Cristancho, Fernando (28 de ene. de 2025). *Instrumentación Nuclear: Prácticas Experimentales*. Universidad Nacional de Colombia.
- Firestone, R. B. y V. S. Shirley (Eds.) (1 de ene. de 1996). "Table of Isotopes, 8th Edition". En.