

Interazione gamma con la materia

Gianluca Cavallaro
Marco Gobbo

19 Maggio 2020

1 Introduzione

1.1 Scopo dell'esperienza e rivelatore

Lo scopo di questa esperienza è quello di indagare le caratteristiche dell'interazione gamma con la materia, utilizzando differenti sorgenti e materiali come bersaglio. Per fare questo si sfrutta un rivelatore al germanio: rivelatore a semiconduttore che sfrutta la tecnologia della giunzione P-N, sottoposta ad un droggaggio opportuno. Nella giunzione P-N è presente una regione: la zona di svuotamento, dove non sono presenti cariche libere. Una volta che una radiazione gamma attraversa questa zona crea delle coppie elettrone-lacuna, le quali, accellerate da una differenza di potenziale opportuna, generano una corrente che permette in ultima istanza di risalire all'energia depositata dal gamma nel rivelatore. In spettroscopia la giunzione va polarizzata inversamente, in modo tale che all'interno del rivelatore non ci sia nessuna corrente che si sovrapponga a quella generata dalla raccolta di cariche, così da ottenere misure corrette. L'utilizzo del germanio come semiconduttore comporta che il rivelatore sia mantenuto ad una temperatura molto bassa, di circa 77 K, durante il suo utilizzo: questo è dovuto al fatto che il germanio ha un gap energetico fra banda di conduzione e banda di valenza molto basso (0.67 eV), e se il rivelatore fosse lasciato a temperatura ambiente la sola agitazione termica sarebbe sufficiente a superarlo, ostacolando le misure. Si ottiene questa condizione attraverso un bagno in azoto liquido.

1.2 La radiazione gamma

La radiazione gamma, attraversando la materia viene attenuata, con modalità e caratteristiche che dipendono dall'energia della radiazione e dal materiale utilizzato come schermo. Se andiamo a considerare un fascio di gamma di intensità iniziale I_0 , attraversando un certo materiale il fascio sarà attenuato secondo la seguente relazione:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

dove μ indica il coefficiente di attenuazione lineare, caratteristico del mezzo utilizzato e variabile con la sua densità, e x indica lo spessore del materiale attraversato. Rilevante è il coefficiente di attenuazione massico, μ/ρ , ottenuto tramite il coefficiente di attenuazione lineare: esso è costante per un determinato mezzo, indipendentemente dalla densità dello stesso.

Nella loro interazione con la materia, i gamma possono andare incontro a diversi processi, principalmente 3: effetto fotoelettrico, scattering compton e produzione di coppie. Per quanto riguarda l'effetto fotoelettrico, il gamma interagisce con un elettrone atomico, cedendo completamente la sua energia all'elettrone che viene liberato dall'atomo. L'atomo ionizzato andrà incontro a processi di ricombinazione per riempire la lacuna lasciata dal fotoelettrone liberato, emettendo in questo caso dei gamma caratteristici. Nello scattering compton il gamma interagisce con un fotone del mezzo, cedendogli parte della sua energia, e venendo deviato di un certo angolo rispetto alla sua direzione iniziale. L'energia ceduta dipende dall'angolo di scattering del gamma. La produzione

di coppie è un processo che può avvenire solo se l'energia del gamma in questione è superiore ad una certa soglia, che in questo caso è 1.022 MeV, ossia due volte la massa dell'elettrone. In questo processo il gamma crea una coppia elettrone-positrone, con quest'ultimo che, essendo poco stabile, decadrà rapidamente in due gamma da 511 keV ciascuno.

Per l'interazione dei gamma con la materia è necessario introdurre la sezione d'urto, ossia la probabilità di interazione del gamma con un bersaglio del mezzo considerato. La sezione d'urto è legata al coefficiente di attenuazione lineare attraverso la relazione:

$$\sigma_{tot} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{A}{N_{Av}} \quad (2)$$

dove A indica il numero di massa del materiale usato come bersaglio, e N_{Av} indica il numero di Avogadro. Si nota in particolar modo come la sezione d'urto sia proporzionale al coefficiente di attenuazione massico. Nel caso dell'interazione gamma va sottolineato che, essendo possibili diverse interazioni, la sezione d'urto totale dipende dalla sezione d'urto caratteristica di ogni singolo processo. Le singole sezioni d'urto hanno una dipendenza diversa dall'energia del gamma incidente e dallo Z del materiale:

$$\sigma_{fotoelettrico} \propto \frac{Z^5}{E_\gamma^{3.5}} \quad (3)$$

$$\sigma_{compton} \propto \frac{Z}{E} \quad (4)$$

$$\sigma_{coppie} \propto Z^2 \cdot \ln(E) \quad (5)$$

$$\sigma_{tot} = \sigma_{fotoelettrico} + \sigma_{compton} + \sigma_{coppie} \quad (6)$$

È possibile fare a priori alcune considerazioni: per materiali ad alto Z sarà preponderante l'effetto fotoelettrico, mentre in materiale a Z inferiore diventa sempre più importante il contributo del Compton o della produzione di coppie. Anche a seconda del range di energie considerato può essere più significativo il contributo del fotoelettrico, a basse energie, o del Compton e della produzione di coppie, ad energie sempre più alte.

2 Strumentazione

- Crate NIM per alimentazione di elettronica standard
- Rivelatore coassiale HPGe (Ortec Coaxial HPGe Detector GEM20P)
- Generatore HV Label Model 8124 per tensione di polarizzazione
- Amplificatore CAEN Model N968
- ADC/MCA CAEN Model N957
- Sorgenti di calibrazione: 22Na, 60Co, 228Th
- Becker graduato per contenere acqua
- Dischi di rame e piombo

3 Raccolta dati ed elaborazione

3.1 Coefficiente di attenuazione lineare

Abbiamo a disposizione 3 diverse sorgenti di radiazione (^{22}Na , ^{60}Co , ^{228}Th) e 3 materiali da interporre fra sorgente e rivelatore (acqua, rame, piombo). Dei 3 materiali si possono cambiare gli spessori utilizzati: 4, 8, 12, 16, 20 cm per l'acqua; 0.11, 0.22, 0.33, 0.44, 0.54 cm per il rame; 0.1, 0.21, 0.33, 0.58, 1.08 cm per il piombo. Tali spessori sono raggiunti riempiendo un becker nel caso dell'acqua e impilando dei dischi nel caso di rame e piombo. Mantenendo la sorgente ad una distanza fissata dal rivelatore e modificando di volta in volta lo spessore del materiale, si raccoglie lo spettro gamma. Riportiamo di seguito degli esempi:

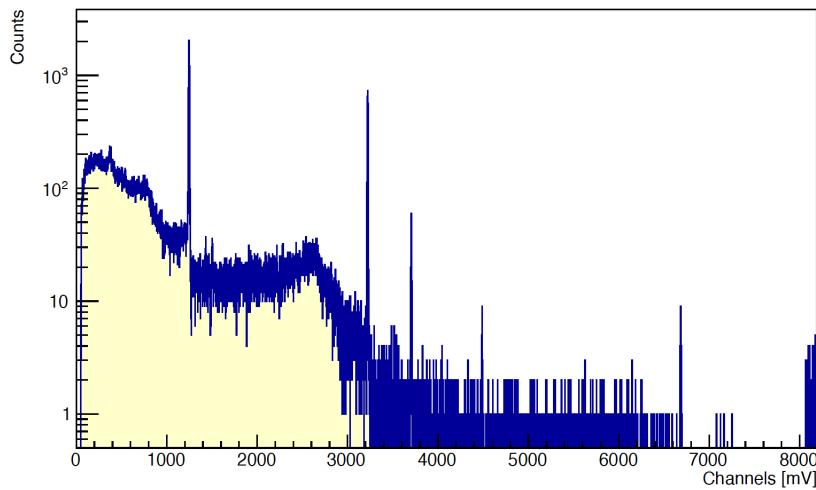


Figura 1: Spettro del sodio con acqua in scala logaritmica (4 cm)

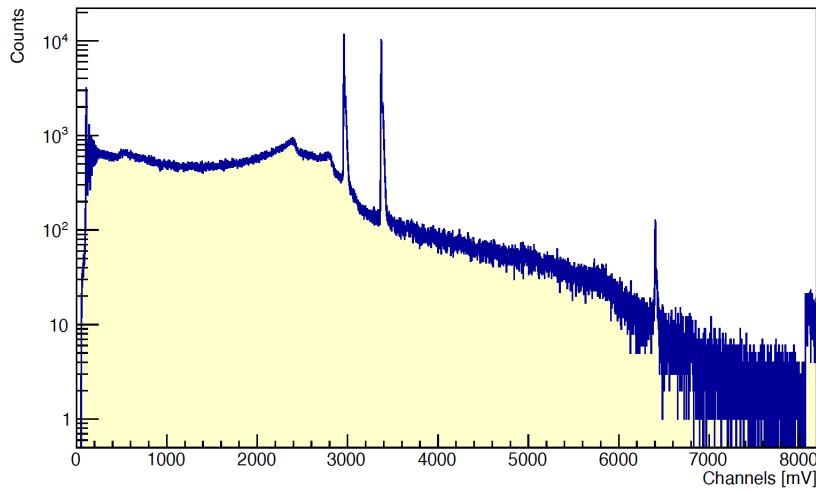


Figura 2: Spettro del colbalto con rame in scala logaritmica (11 cm)

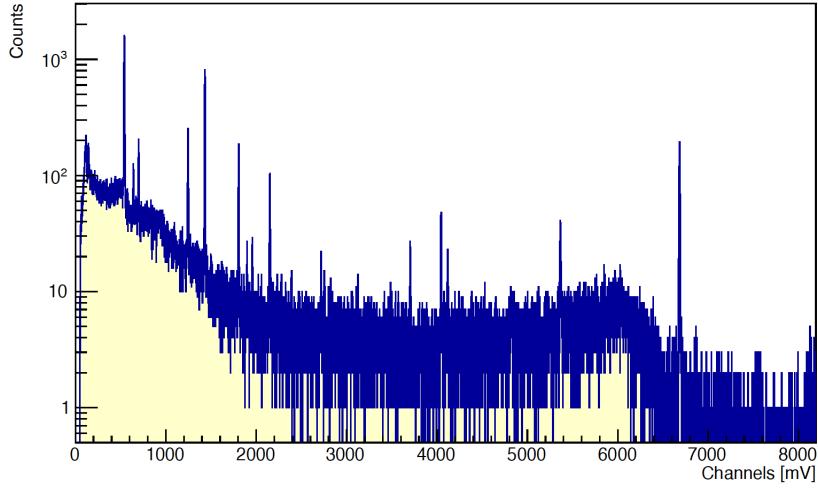


Figura 3: Spettro del torio con piombo in scala logaritmica (1 cm)

Per ogni picco visibile dei vari spettri, si procede ad individuare l'area sottesa al picco. In accordo con la relazione (1), all'aumentare dello spessore di materiale da attraversare il numero di gamma che arrivano al rivelatore sarà sempre minore, e di conseguenza sarà minore l'area sottesa alla gaussiana. Riportiamo di seguito alcuni esempi, i restanti vengono riportati in appendice:

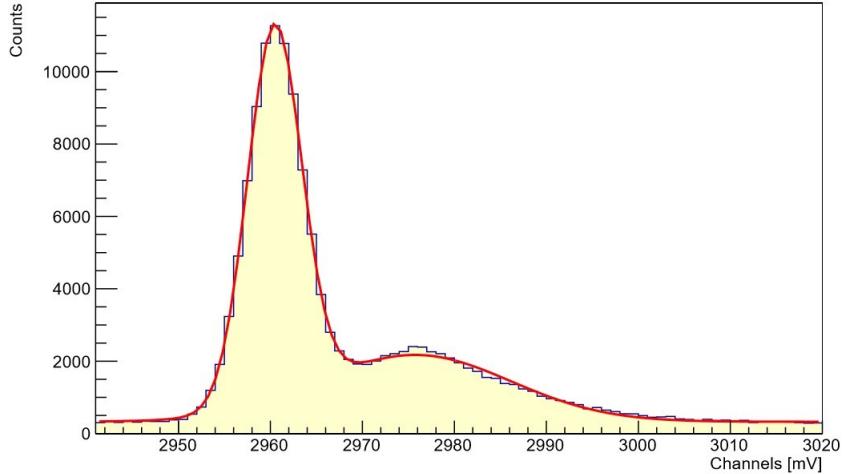


Figura 4: Esempio di picco della sorgente di ^{60}Co

L'interpolazione del picco è stata fatta con la somma di una gaussiana e di un polinomio di grado 0, che modellizza il fondo. In diversi casi, come nella Figura 4, è stato necessario interpolare con una seconda gaussiana. L'area rilevante ai fini dell'esperienza è solo quella della gaussiana principale: per individuarla è stato calcolato l'integrale sotteso ad una gaussiana con i parametri di quella principale, ottenuti dal fit complessivo. Tenendo conto che le misure sono durate 6 minuti per quanto riguarda l'acqua e 2 minuti per rame e piombo, tramite la seguente relazione si procede a calcolare il rate di conteggi al secondo:

$$\text{Rate} = \frac{\text{Area}}{\text{Durata misura}} \quad (7)$$

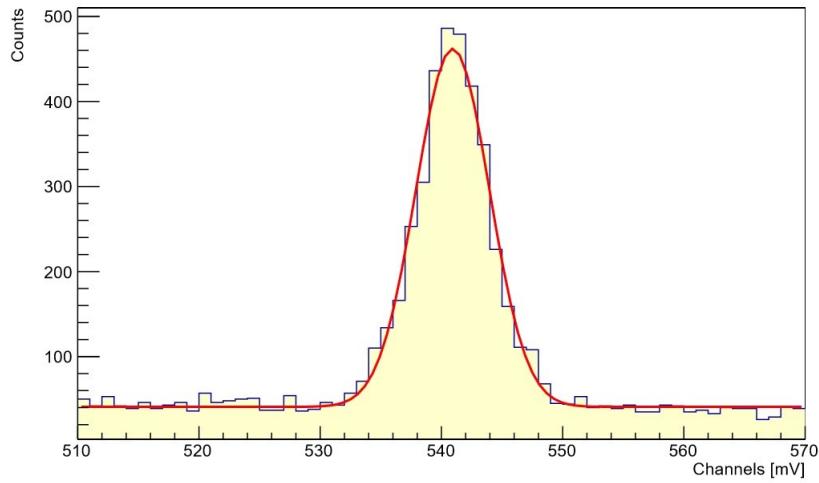


Figura 5: Esempio di picco della sorgente di ^{228}Th

Per calcolare il coefficiente di attenuazione lineare dei vari materiali alle varie energie, si costruisce un grafico del rate in funzione dello spessore. Per interpolare è stata utilizzata la relazione (1):

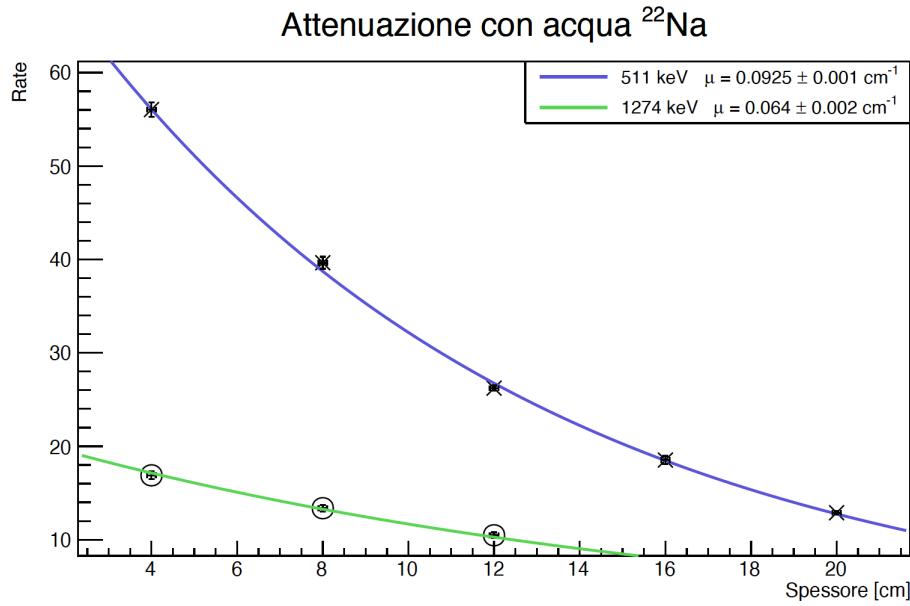


Figura 6: Attenuazione del sodio in acqua

$$511\text{keV} \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 1,305 \quad P - Value = 0,271$$

$$1274\text{keV} \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 0,752 \quad P - Value = 0,521$$

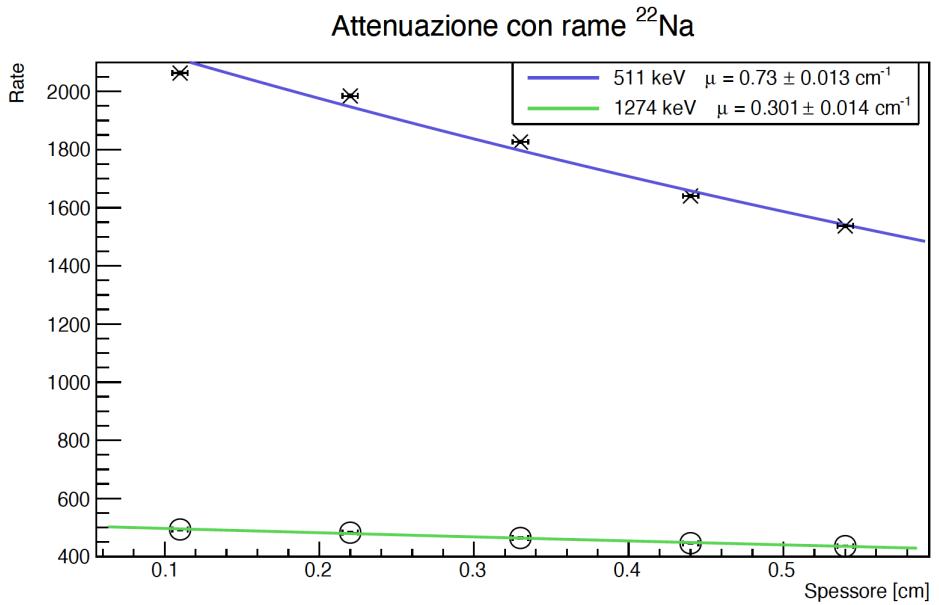


Figura 7: Attenuazione del sodio in rame

$$511\text{keV} \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 21,928 \quad P - Value = 3,40 \cdot 10^{-14}$$

$$1274\text{keV} \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 1,304 \quad P - Value = 0,271$$

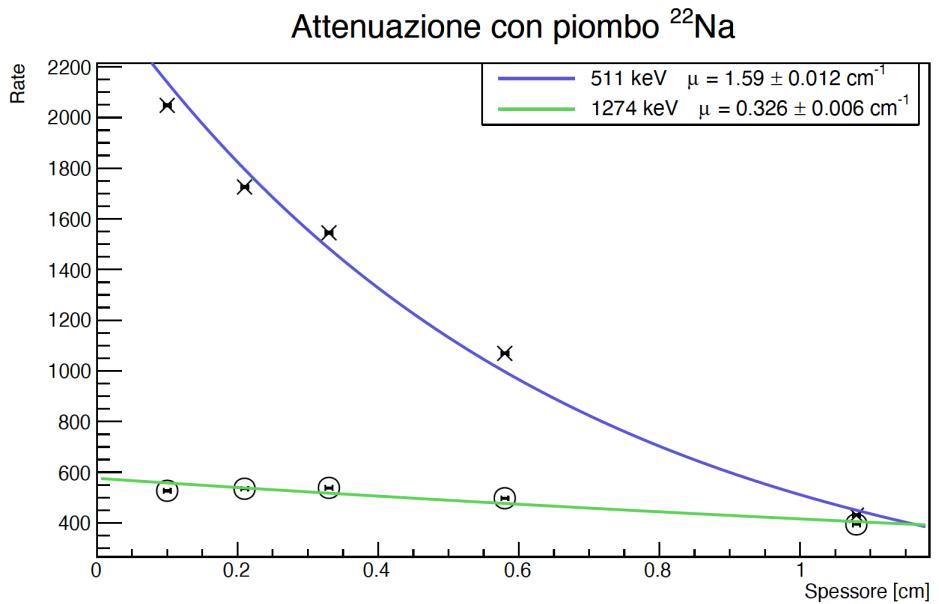


Figura 8: Attenuazione del sodio in piombo

$$511keV \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 59,989 \quad P - Value = 1,55 \cdot 10^{-35}$$

$$1274keV \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 115,919 \quad P - Value = 4,56 \cdot 10^{-75}$$

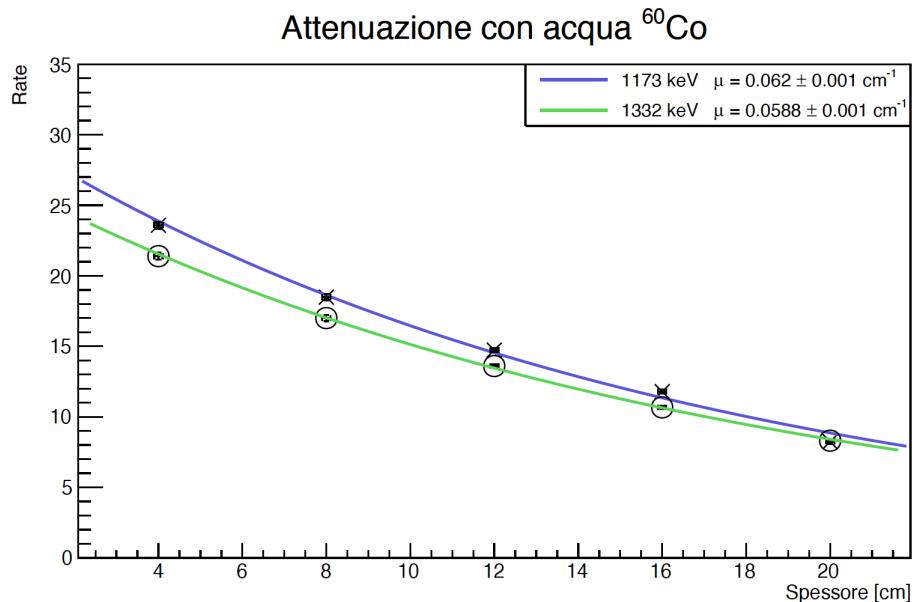


Figura 9: Attenuazione del cobalto in acqua

$$1173keV \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 8,380 \quad P - Value = 1,44 \cdot 10^{-5}$$

$$1332keV \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 0,635 \quad P - Value = 0.591$$

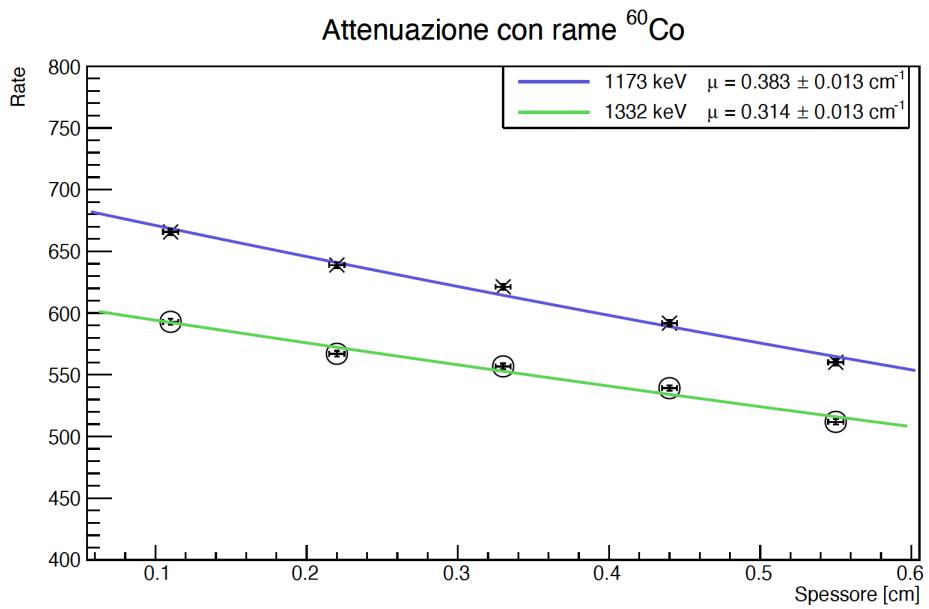


Figura 10: Attenuazione del cobalto in rame

$$\begin{aligned}
 1173\text{keV} & \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 3,872 \quad P - Value = 0,001 \\
 1332\text{keV} & \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 4,796 \quad P - Value = 0,002
 \end{aligned}$$

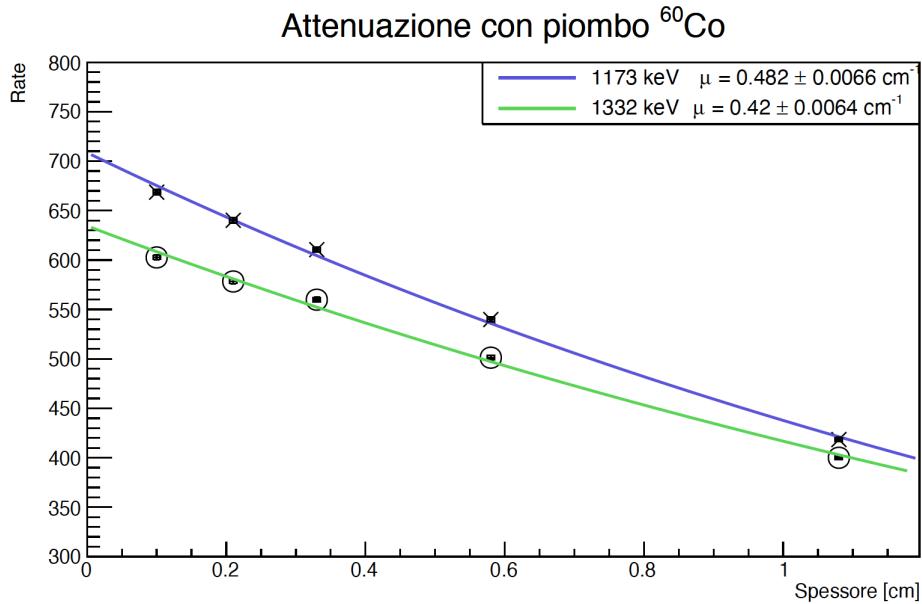


Figura 11: Attenuazione del cobalto in piombo

$$\begin{aligned}
1173 \text{ keV} \quad & \frac{\chi^2}{NDF} = 4,175 \quad P - Value = 0.006 \\
1332 \text{ keV} \quad & \frac{\chi^2}{NDF} = 6,203 \quad P - Value = 3,29 \cdot 10^{-4}
\end{aligned}$$

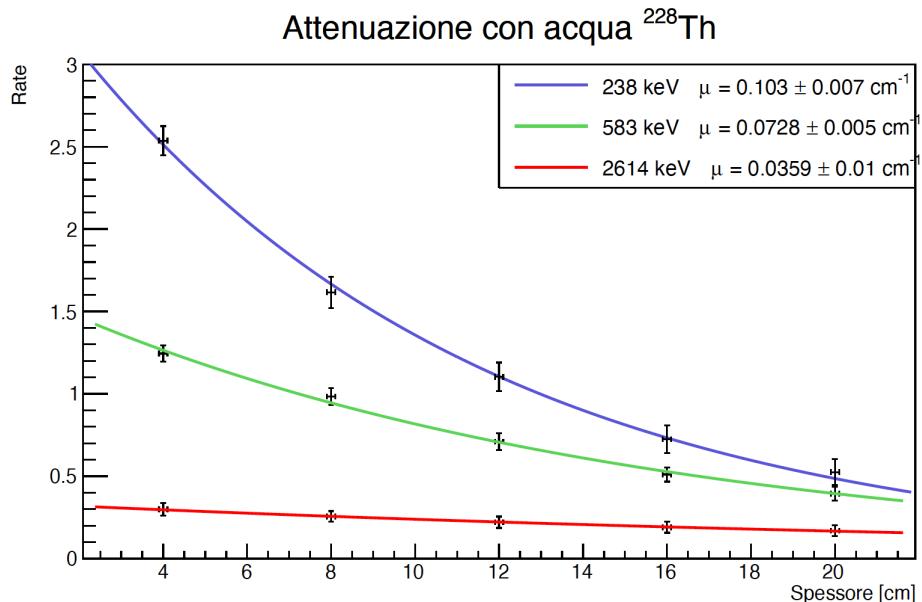


Figura 12: Attenuazione del torio in acqua

$$\begin{aligned}
238 \text{ keV} \quad & \frac{\chi^2}{NDF} = 0,196 \quad P - Value = 0,898 \\
583 \text{ keV} \quad & \frac{\chi^2}{NDF} = 0,287 \quad P - Value = 0,834 \\
2614 \text{ keV} \quad & \frac{\chi^2}{NDF} = 0,007 \quad P - Value = 0,999
\end{aligned}$$

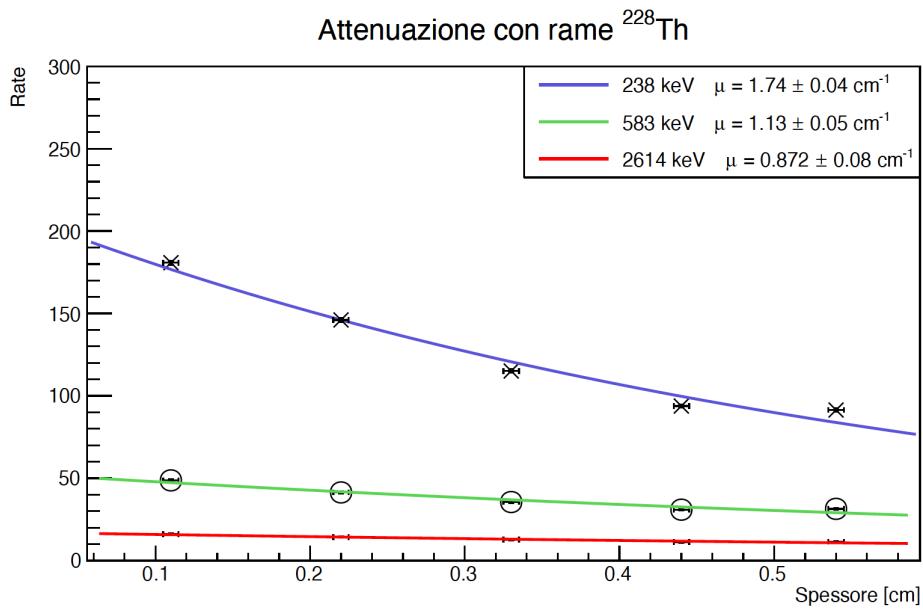


Figura 13: Attenuazione del torio in rame

$$\begin{aligned}
 238\text{keV} & \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 27,275 \quad P - Value = 1,24 \cdot 10^{-17} \\
 583\text{keV} & \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 11,902 \quad P - Value = 8,64 \cdot 10^{-8} \\
 2614\text{keV} & \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 3,210 \quad P - Value = 0,022
 \end{aligned}$$

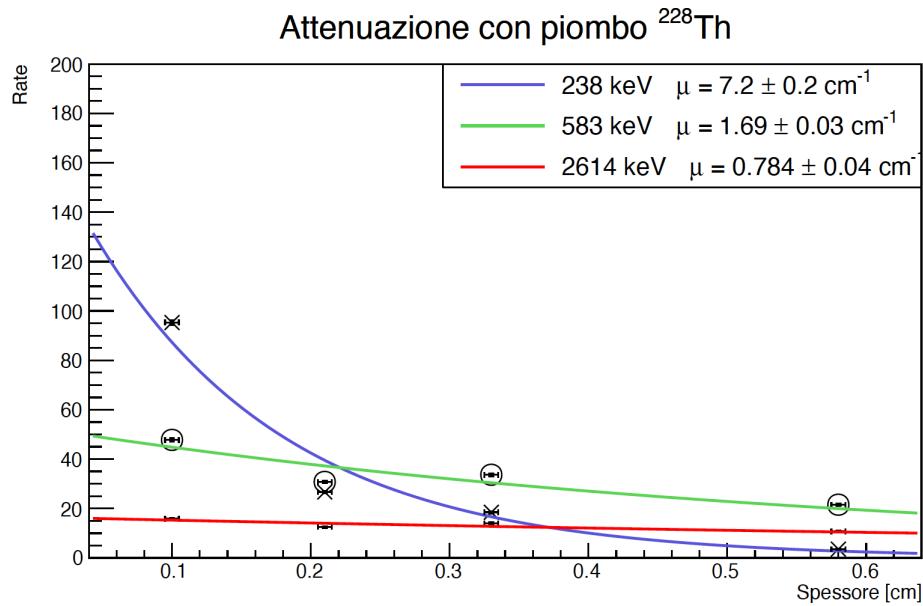


Figura 14: Attenuazione del torio in piombo

$$\begin{aligned}
238\text{keV} & \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 45,907 \quad P - Value = 1,15 \cdot 10^{-20} \\
583\text{keV} & \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 56,804 \quad P - Value = 1,03 \cdot 10^{-36} \\
2614\text{keV} & \quad \frac{\chi^2}{NDF} = 12,216 \quad P - Value = 5,46 \cdot 10^{-8}
\end{aligned}$$

Si può notare come l'andamento del rate dei vari picchi rispecchi quello esponenziale decrescente. Tuttavia i valori di P-Value e χ^2 ridotto mostrano come diversi punti si discostino dall'andamento atteso. In alcuni casi questo può essere dovuto ad una errata misura dell'area sottesa al picco e nelle sezioni successive risulterà ancora più evidente come tali punti non rispecchino esattamente l'andamento atteso.

3.2 Picco a 1460 keV

Negli spettri a nostra disposizione si nota la presenza di un picco non atteso, attorno ad una energia di 1460 keV. La presenza di questo picco è dovuta alla presenza di ^{40}K nell'ambiente. Come fatto nel punto precedente, andiamo a calcolare il rate di conteggi al secondo di questo picco, mettendolo in funzione dello spessore del materiale:

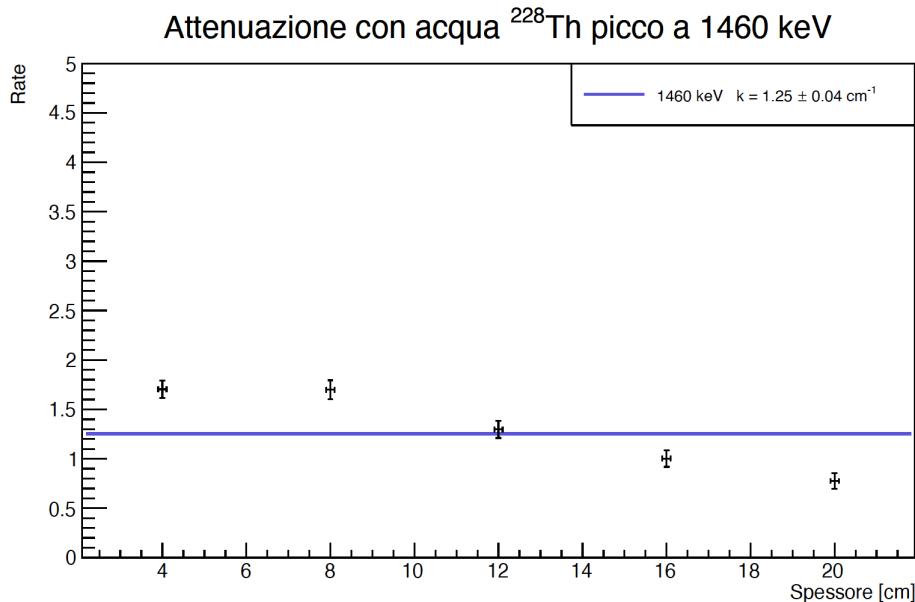


Figura 15: Andamento rate picco a 1460 keV

L'andamento riportato è relativo alla sorgente di torio con acqua come bersaglio. Il picco in questione risulta più evidente in alcuni spettri rispetto ad altri, dove il rate del fondo è paragonabile a quello del ^{40}K , e l'andamento del picco di nostro interesse si confonde con il fondo stesso. Si nota come il rate del ^{40}K sia pressoché costante: questo è dovuto al fatto che, essendo questo picco dovuto alla radioattività ambientale, non è prodotto dalla sorgente in questione e di conseguenza non deve attraversare il materiale venendo attenuato. Dunque, per misure della stessa durata temporale il numero di conteggi al secondo di questo isotopo sarà costante.

3.3 Coefficiente di attenuazione massico e sezione d'urto

Avendo a disposizione i coefficienti di attenuazione lineare μ ricavati nella sezione 3.1, andiamo a calcolare i coefficienti di attenuazione massici μ/ρ . Per i 3 materiali si utilizzano come densità:

$$\begin{aligned}\rho_{acqua} &= 1 \text{ g/cm}^3 \\ \rho_{rame} &= 8,96 \text{ g/cm}^3 \\ \rho_{piombo} &= 11,34 \text{ g/cm}^3\end{aligned}$$

I risultati ottenuti vengono messi in un grafico in funzione dell'energia, ottenendo in totale 3 grafici, uno per ciascun materiale bersaglio. Come sottolineato nell'introduzione, attraverso la relazione (2), la sezione d'urto è proporzionale a μ/ρ . In questi 3 grafici, avendo fissato di volta in volta il materiale, la sezione d'urto è ottenuta semplicemente moltiplicando i valori ottenuti per un valore costante A/N_{Av} ; per questo l'andamento in funzione dell'energia può essere ricavato semplicemente dal grafico del coefficiente di attenuazione massico.

3.3.1 Acqua

Riportiamo di seguito il grafico di μ/ρ in funzione dell'energia per l'acqua:

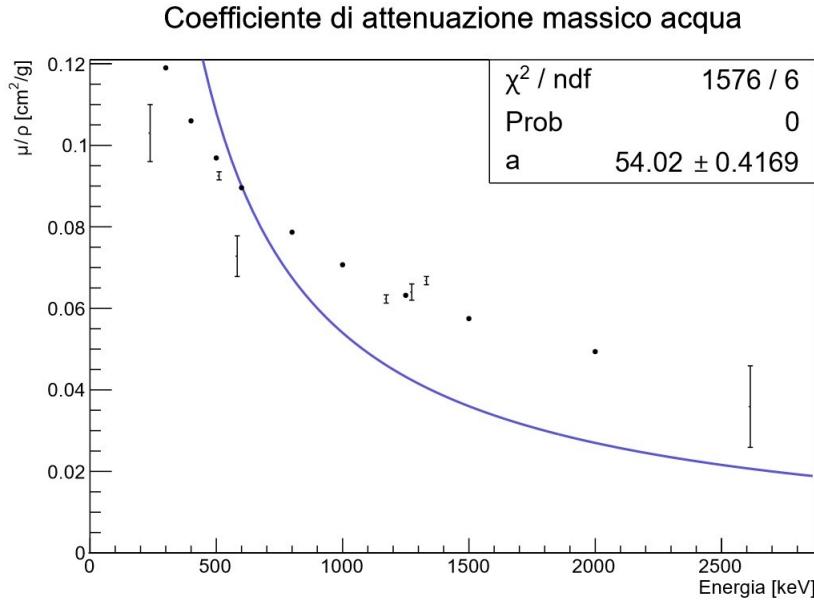


Figura 16: Coefficiente di attenuazione massico per acqua

Il grafico è stato interpolato, tenendo conto delle relazioni (3), (4) e (5), con la seguente funzione:

$$\sigma = \frac{a}{E} \quad (8)$$

poichè, nel range di energie considerate, in acqua, prevale lo scattering Compton. Nel grafico è riportato anche l'andamento teorico del coefficiente di attenuazione massico, rappresentato dai pallini. Si può notare come, appunto, prevalga l'effetto Compton in questo range di energie, seppur i dati sperimentali non siano completamente conformi alla teoria. Ciò è dovuto principalmente ad una sottostima del coefficiente μ a determinate energie, difficoltà ascrivibile al calcolo delle corrette aree sottese ai picchi nei vari spettri.

3.3.2 Rame

Riportiamo di seguito il grafico di μ/ρ in funzione dell'energia per il rame:

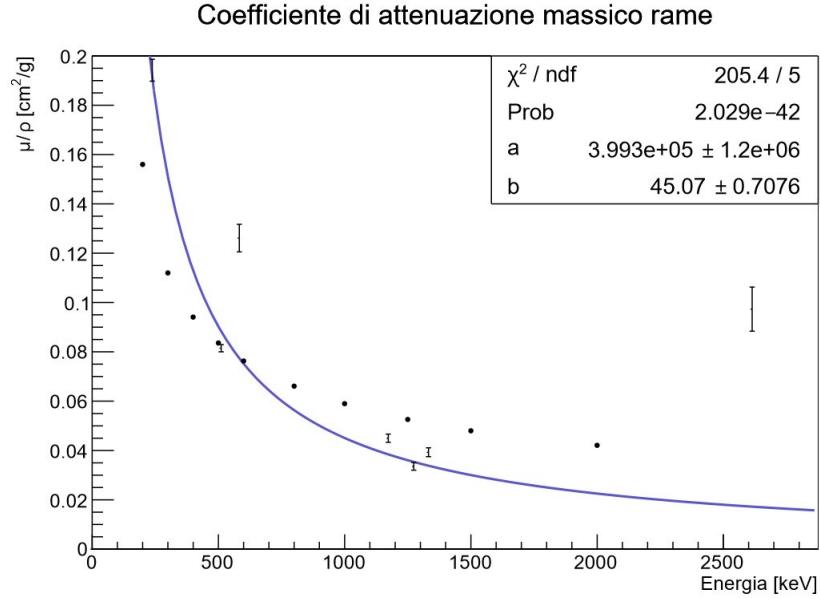


Figura 17: Coefficiente di attenuazione massico per rame

Il grafico è stato interpolato, tenendo conto delle relazioni (3), (4) e (5), con la seguente funzione:

$$\sigma = \frac{a}{E^{3.5}} + \frac{b}{E} \quad (9)$$

poichè, nel range di energie considerate prevale l'effetto Compton, ma avendo il rame uno Z=29 anche l'effetto fotoelettrico comincia ad essere rilevante. In particolar modo l'effetto fotoelettrico è importante a basse energie, mentre crescendo in energia nel caso del rame continua ad essere preponderante il Compton. Anche in questo caso, alcuni punti si discostano in modo importante dall'andamento teorico.

3.3.3 Piombo

Riportiamo di seguito il grafico di μ/ρ in funzione dell'energia il piombo:

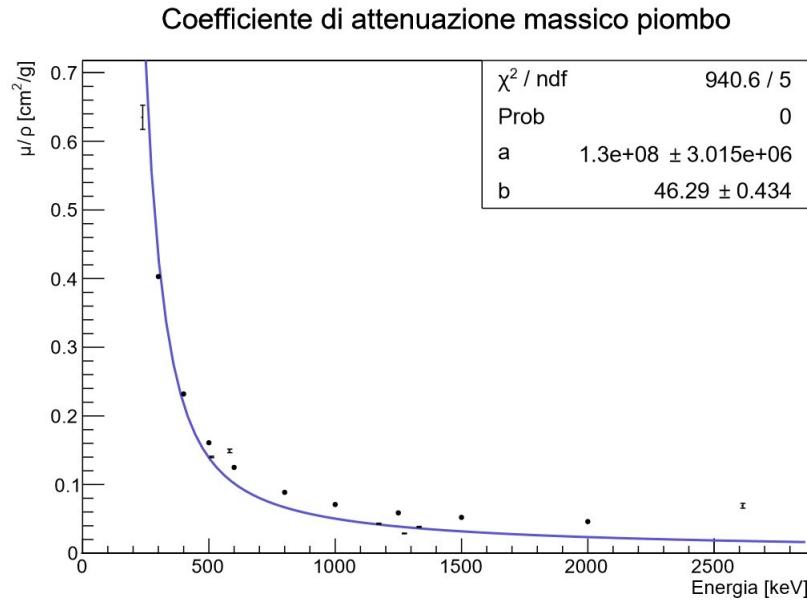


Figura 18: Coefficiente di attenuazione massico per piombo

Il grafico è stato interpolato, tenendo conto delle relazioni (3), (4) e (5), con la seguente funzione:

$$\sigma = \frac{a}{E^{3.5}} + \frac{b}{E} \quad (10)$$

In questo caso stiamo utilizzando un materiale con $Z=82$, molto elevato. Per questo, a basse energie l'effetto fotoelettrico si può notare come sia preponderante, mentre al crescere dell'energia diventa sempre più importante il Compton dato che il termine al denominatore nella relazione diventa sempre più significativo.

3.4 Sezione d'urto in funzione di Z

In questo caso ci proponiamo invece di studiare la dipendenza dalla Z del materiale della sezione d'urto. Fissata l'energia di un certo picco, andiamo a calcolare la sezione d'urto attraverso la relazione (2). Come A è stata utilizzata la massa molecolare dell'acqua e la massa atomica di rame e piombo, pesata in base all'abbondanza dei vari isotopi. Per ogni picco avremo a disposizione 3 valori, ognuno corrispondente ad uno dei 3 materiali usati come bersaglio. Si ottengono i seguenti grafici:

Sezione d'urto in funzione di Z

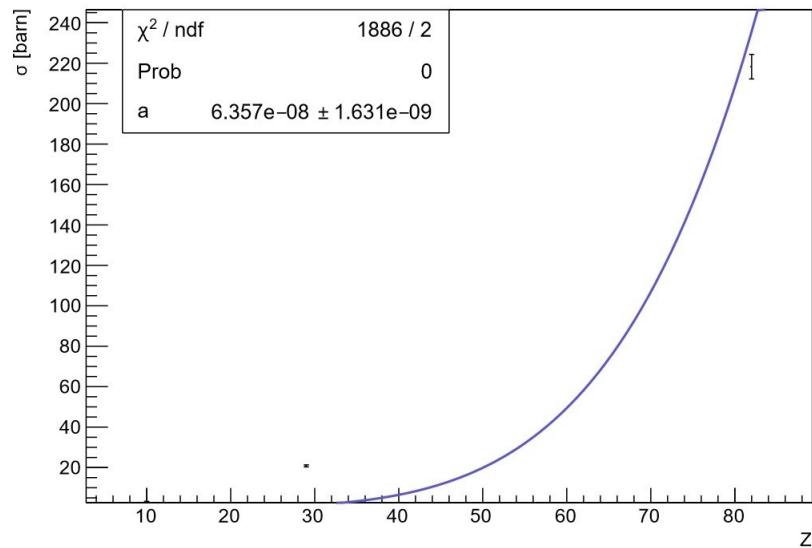


Figura 19: Picco a 238 keV

Sezione d'urto in funzione di Z

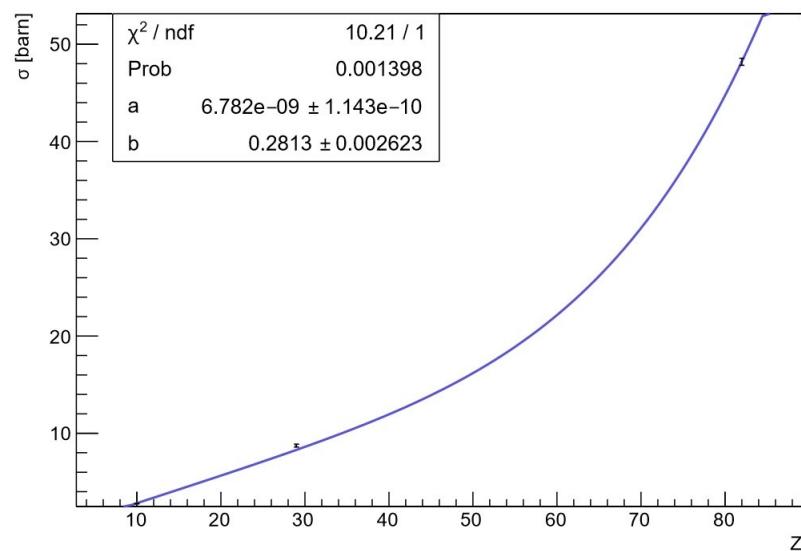


Figura 20: Picco a 511 keV

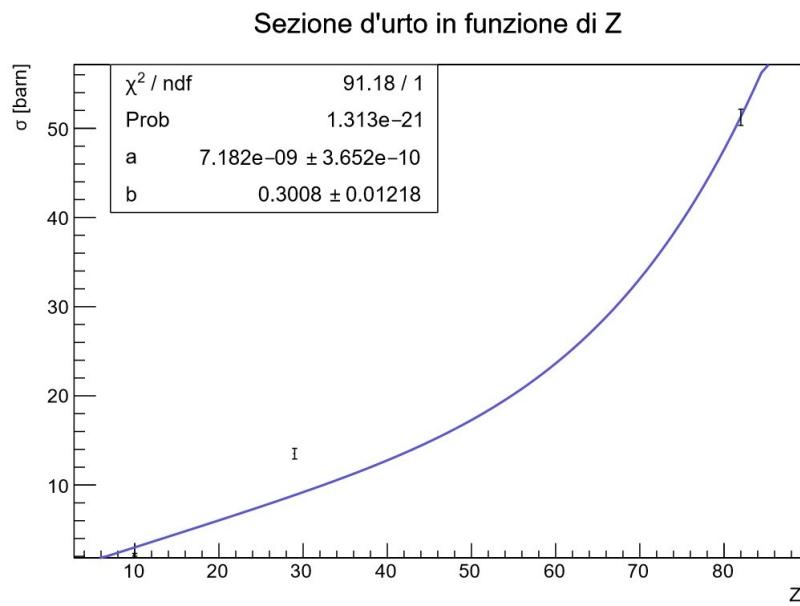


Figura 21: Picco a 583 keV

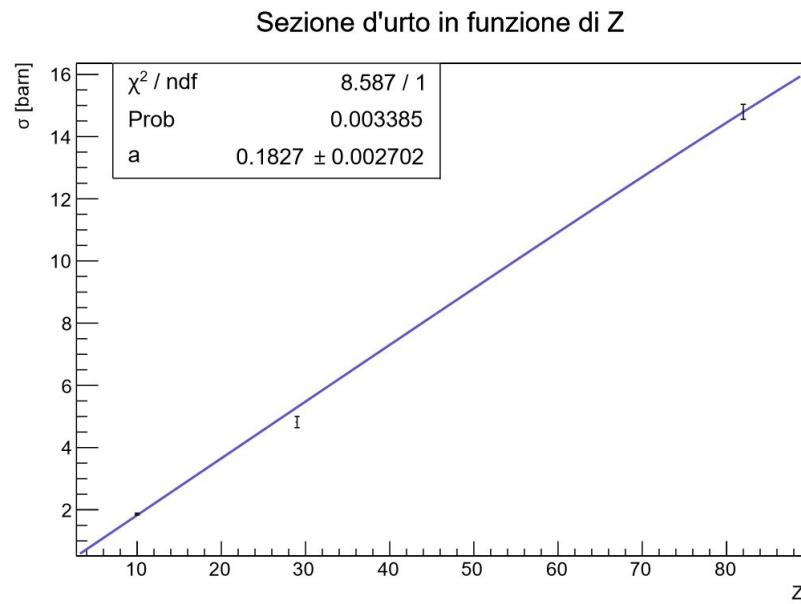


Figura 22: Picco a 1173 keV

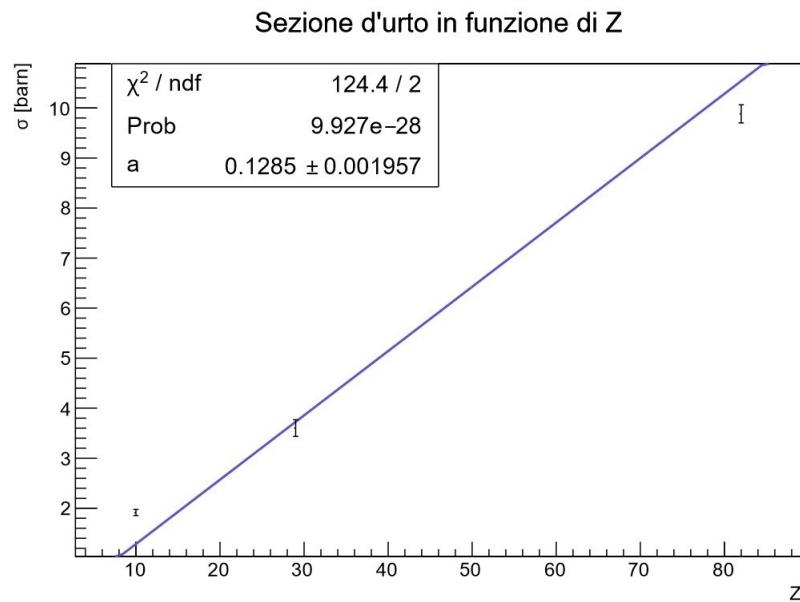


Figura 23: Picco a 1274 keV

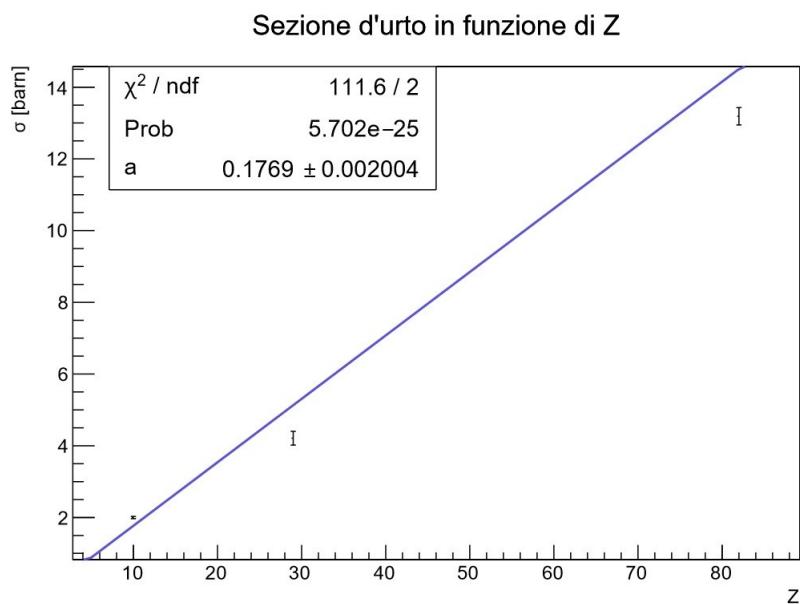


Figura 24: Picco a 1332 keV

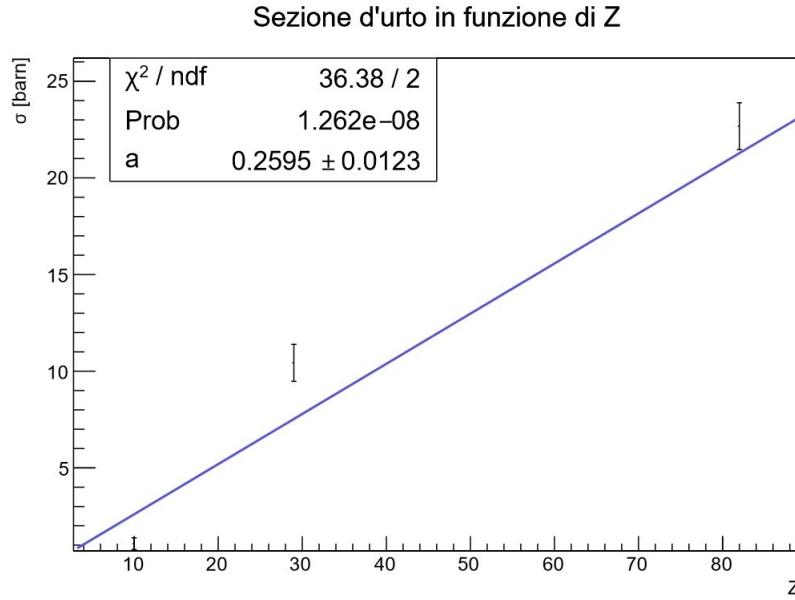


Figura 25: Picco a 2614 keV

dove sull'asse delle y la sezione d'urto σ è riportata in barn.

A seconda dell'energia del picco in questione si interpola con funzioni differenti. Per la figura 19 abbiamo interpolato tenendo conto della relazione (3) dal momento che a basse energie domina l'effetto fotoelettrico; per le figure 20 e 21 abbiamo interpolato con una combinazione lineare delle relazioni (3) e (4), mostrando che per materiali con basso Z come acqua e rame la relazione è già lineare, a prova del fatto che l'effetto preponderante è il Compton, mentre per materiali ad alto Z come il piombo prevale ancora il fotoelettrico; per le restanti figure abbiamo interpolato tenendo conto solo della relazione (4) mostrando come l'andamento sia lineare, provando che l'effetto prevalente sia il Compton. In tutto questo non abbiamo tenuto conto del contributo della produzione di coppie, dal momento che siamo ancora ad energie basse per avere un contributo significativo legato a tale fenomeno. In generale è possibile affermare che per avere una idea migliore e più completa dell'andamento sarebbe stato necessario utilizzare più di 3 materiali come bersaglio.

4 Appendice

4.1 Sodio con acqua a 4, 8, 12, 16 e 20 cm di spessore

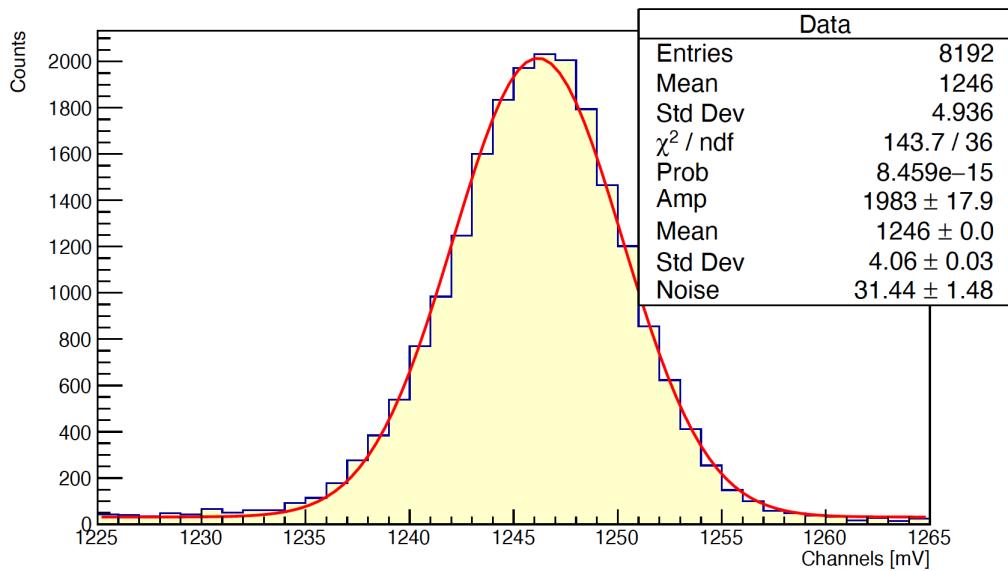


Figura 26: Picco a 511 keV

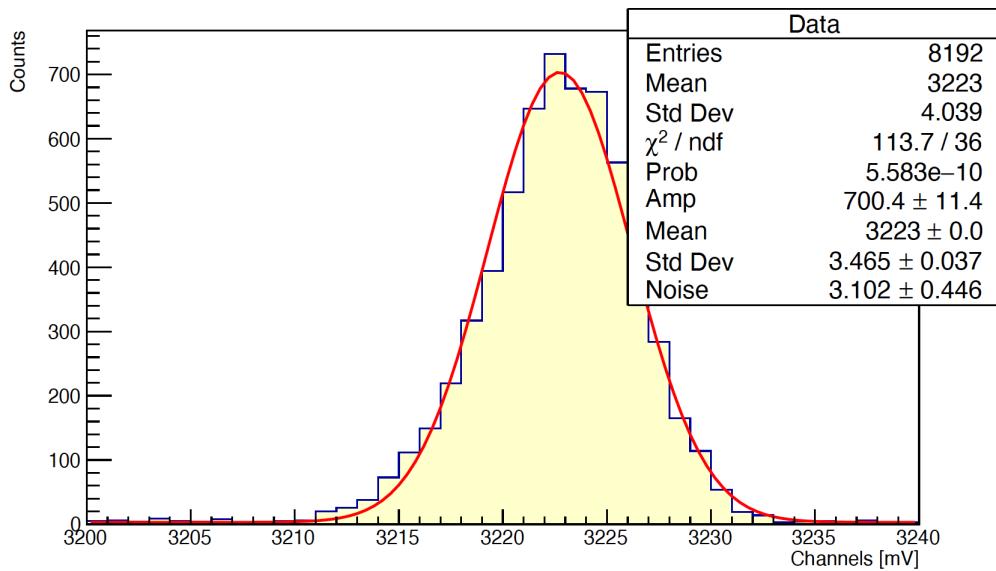


Figura 27: Picco a 1274 keV

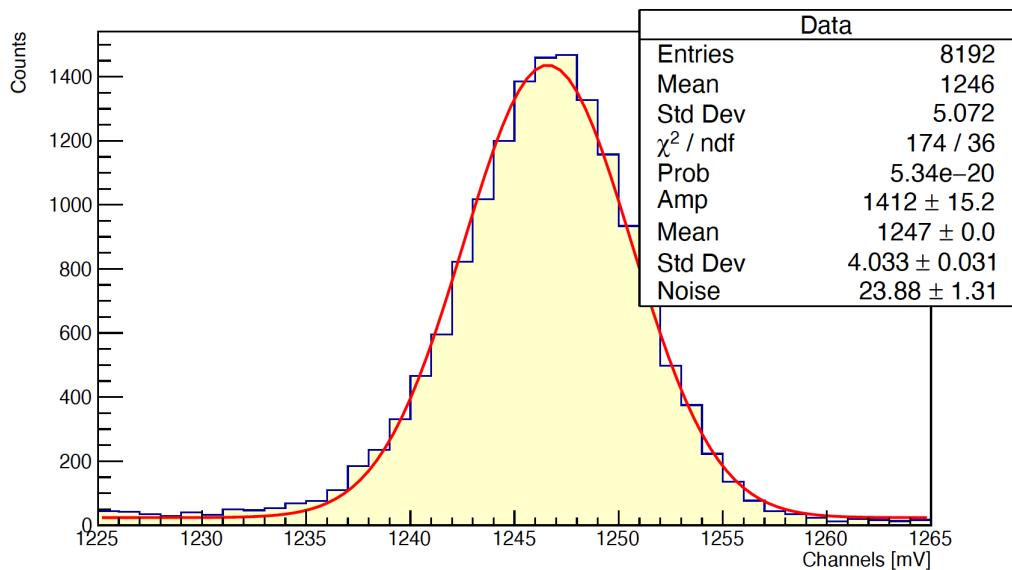


Figura 28: Picco a 511 keV

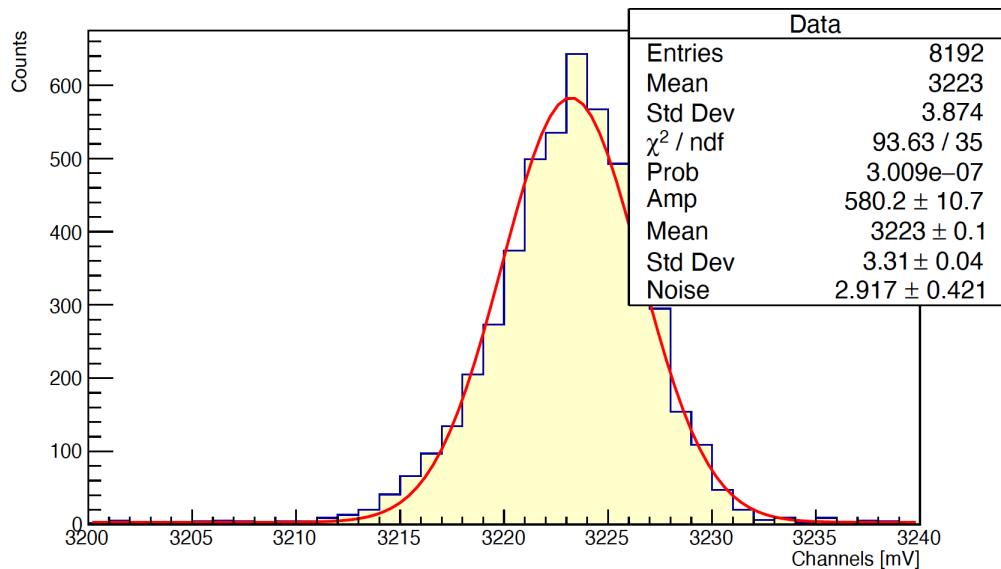


Figura 29: Picco a 1274 keV

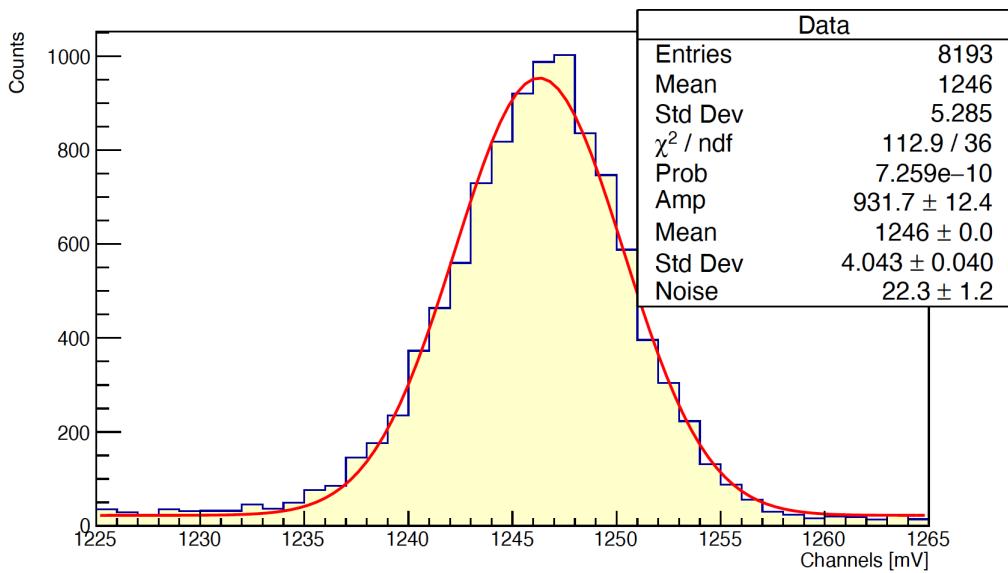


Figura 30: Picco a 511 keV

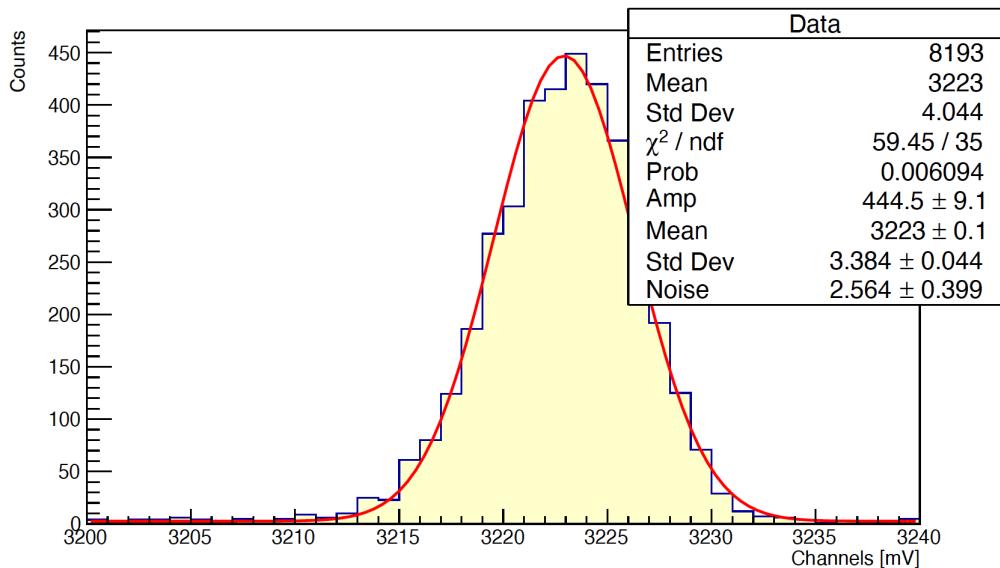


Figura 31: Picco a 1274 keV

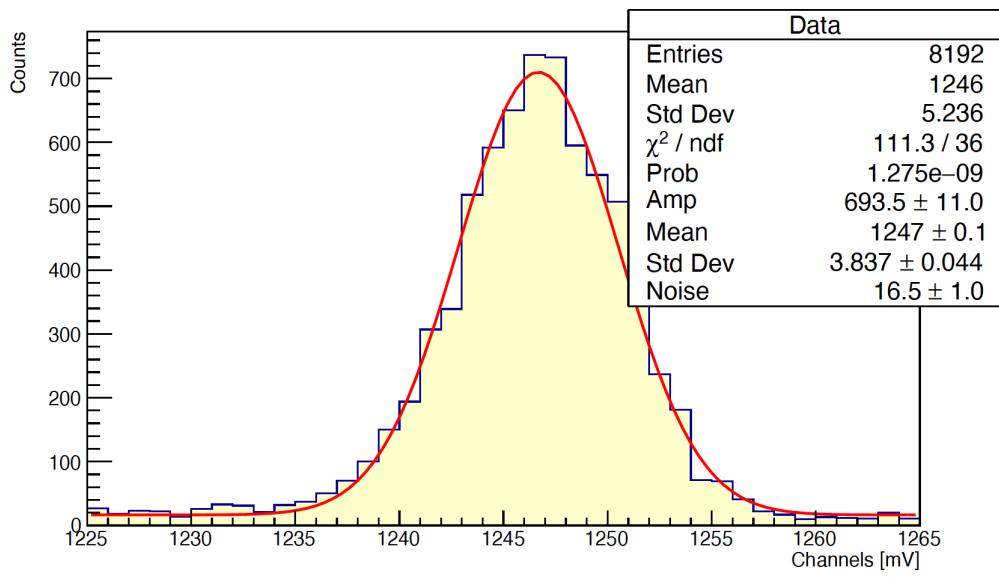


Figura 32: Picco a 511 keV

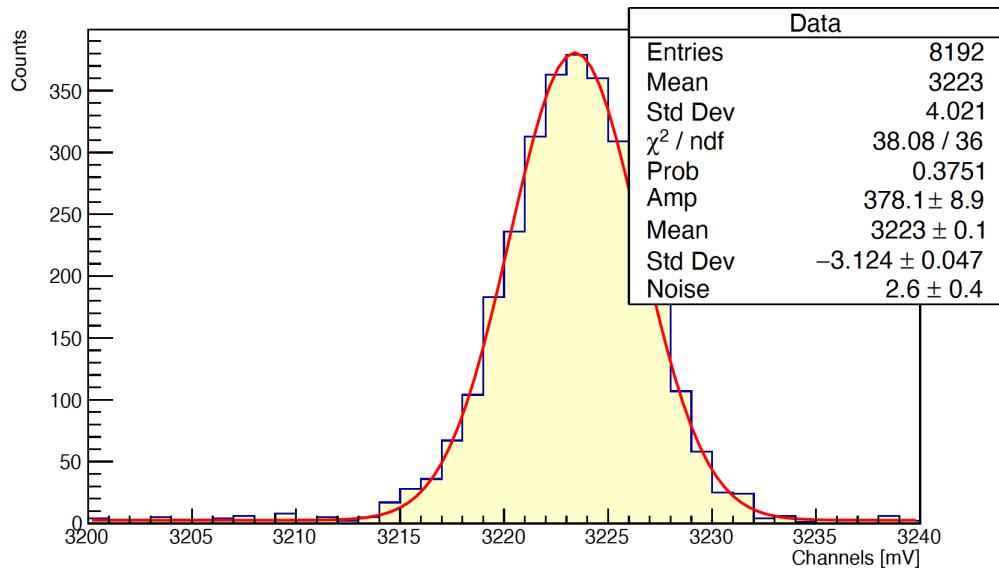


Figura 33: Picco a 1274 keV

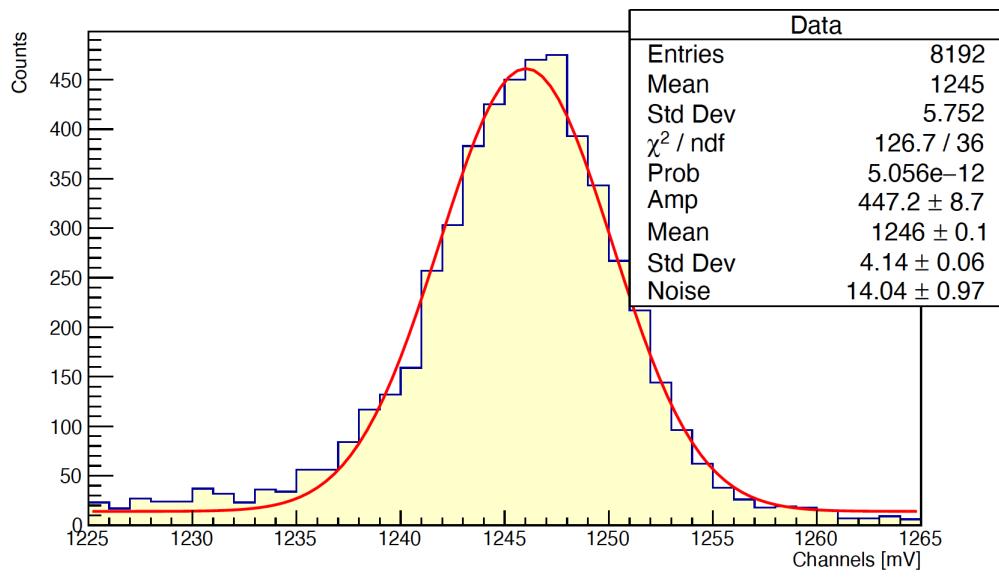


Figura 34: Picco a 511 keV

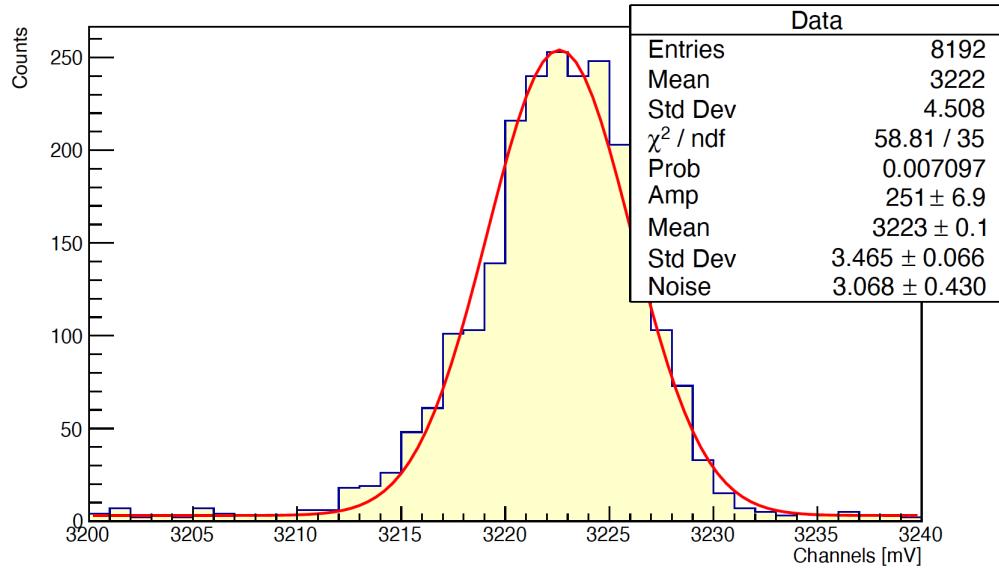


Figura 35: Picco a 1274 keV

4.2 Sodio con rame a 11, 22, 33, 44 e 54 cm di spessore

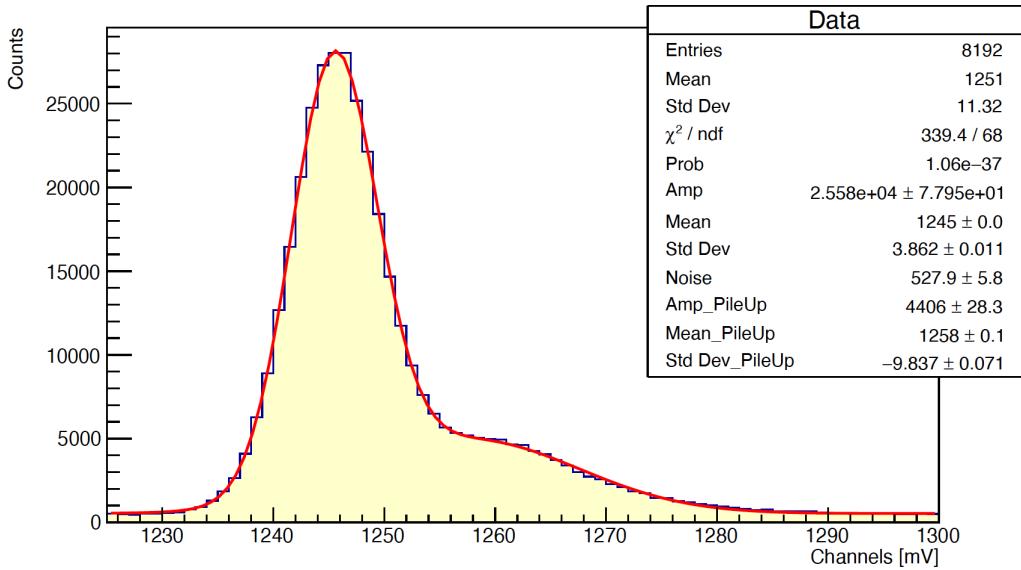


Figura 36: Picco a 511 keV

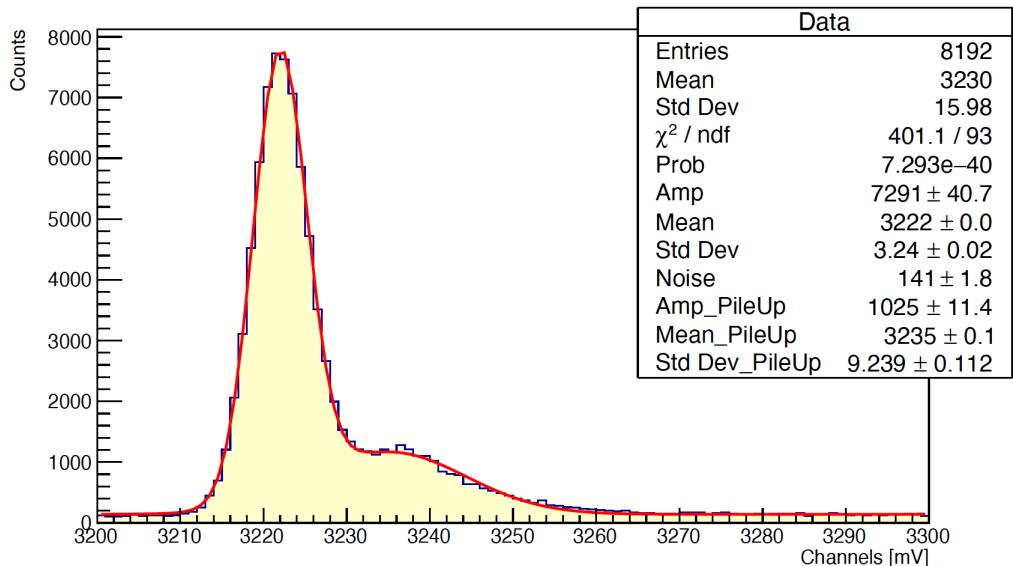


Figura 37: Picco a 1274 keV

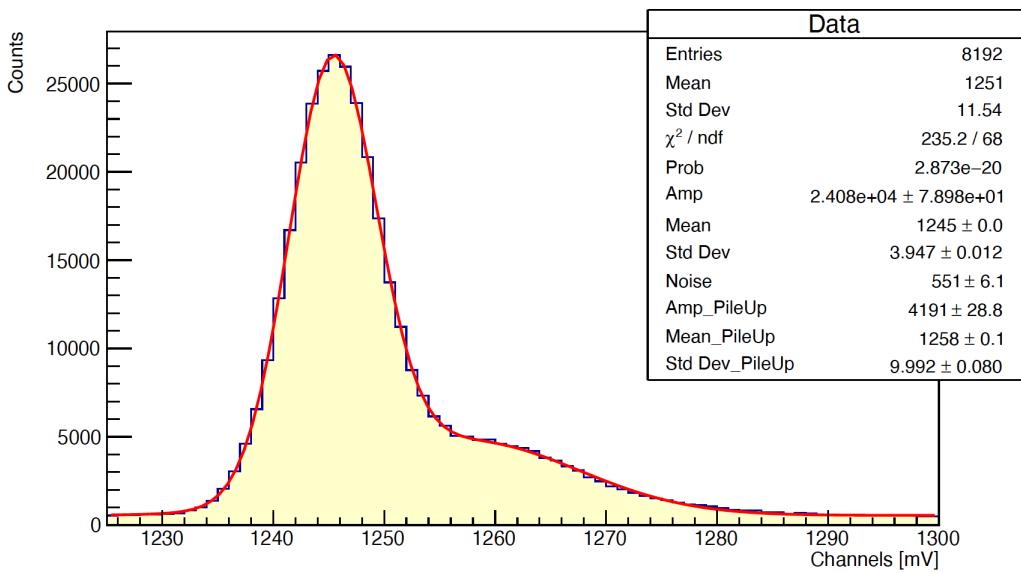


Figura 38: Picco a 511 keV

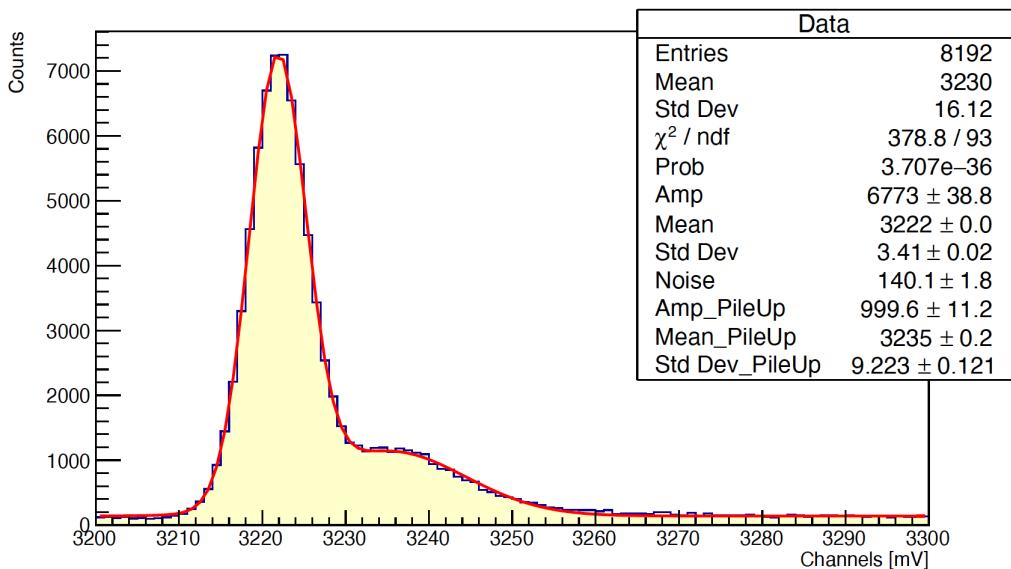


Figura 39: Picco a 1274 keV

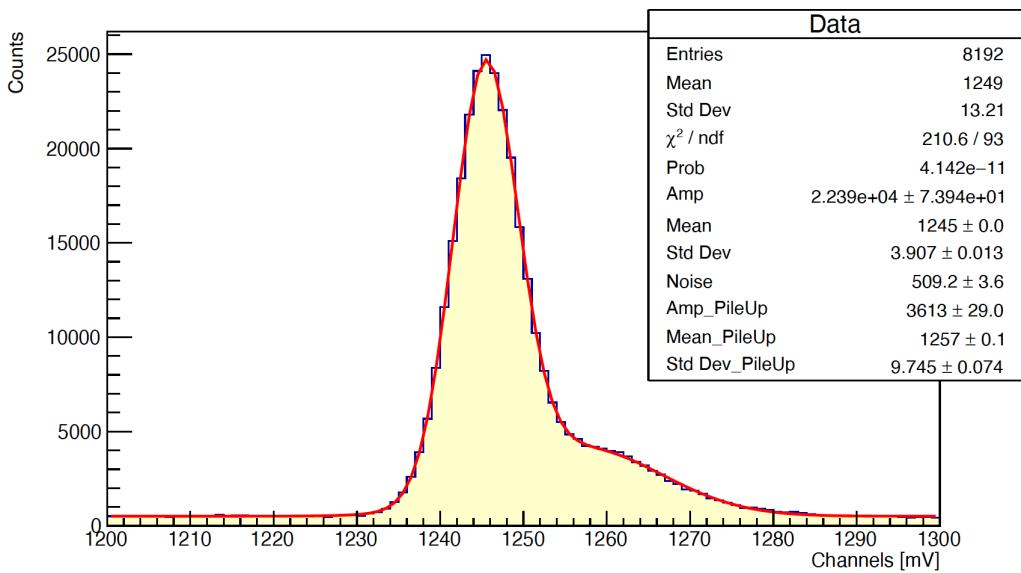


Figura 40: Picco a 511 keV

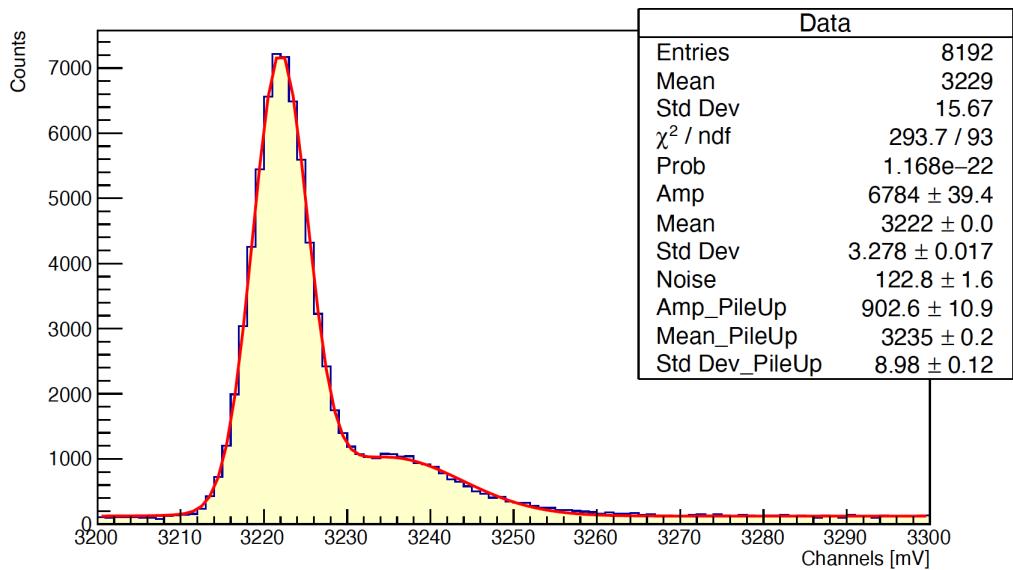


Figura 41: Picco a 1274 keV

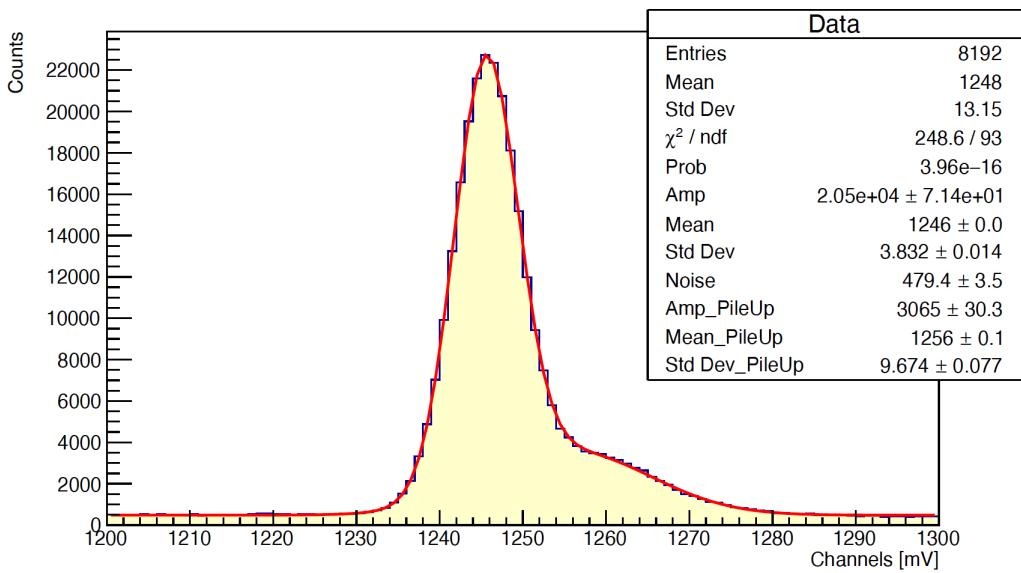


Figura 42: Picco a 511 keV

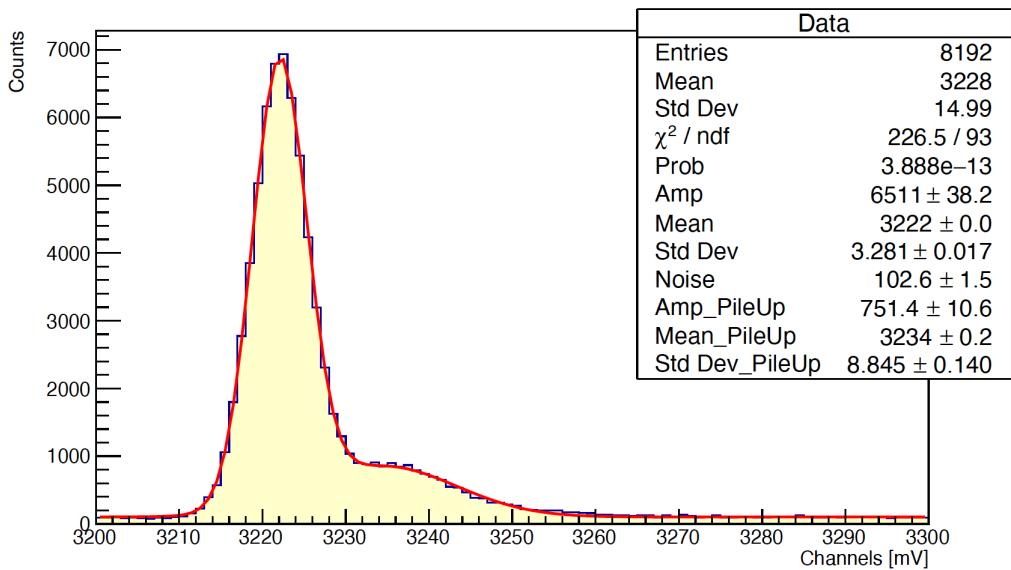


Figura 43: Picco a 1274 keV

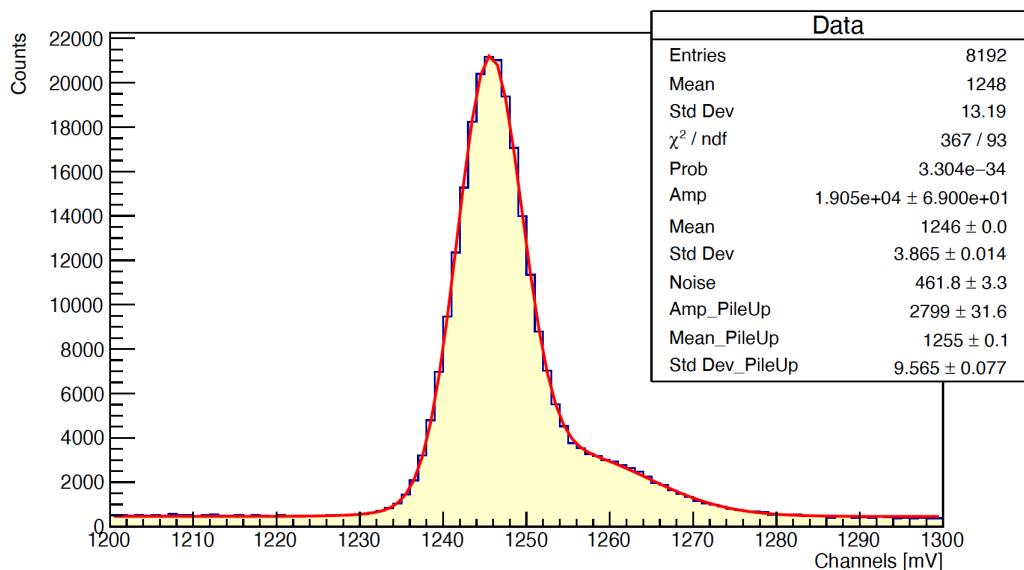


Figura 44: Picco a 511 keV

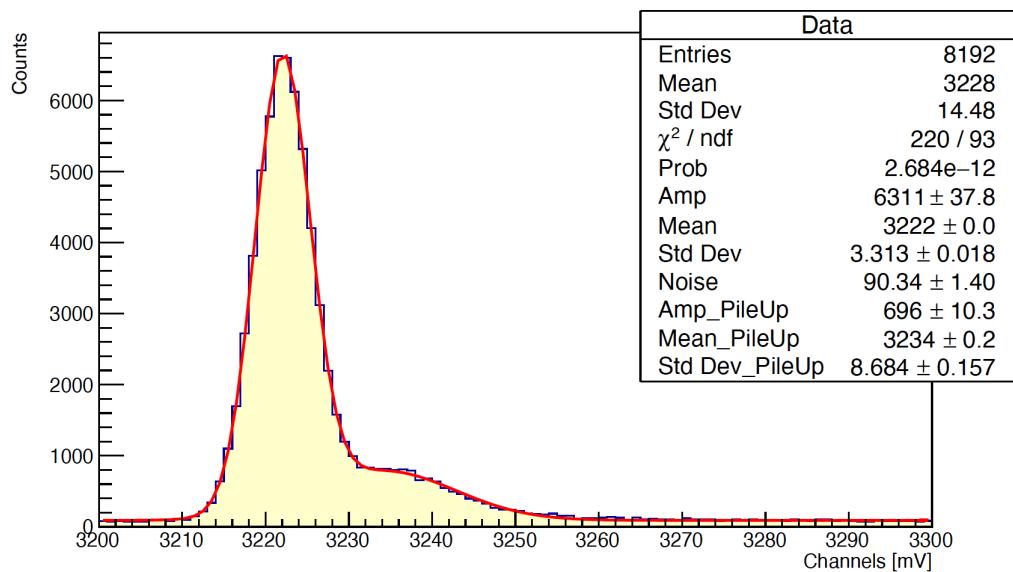


Figura 45: Picco a 1274 keV

4.3 Sodio con piombo a 1, 21, 33, 58 e 108 cm di spessore

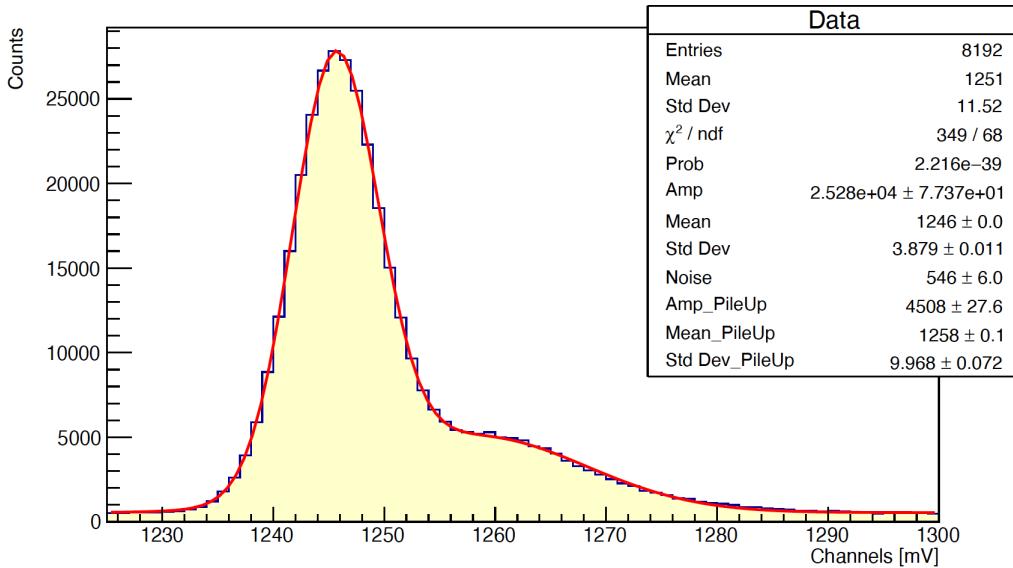


Figura 46: Picco a 511 keV

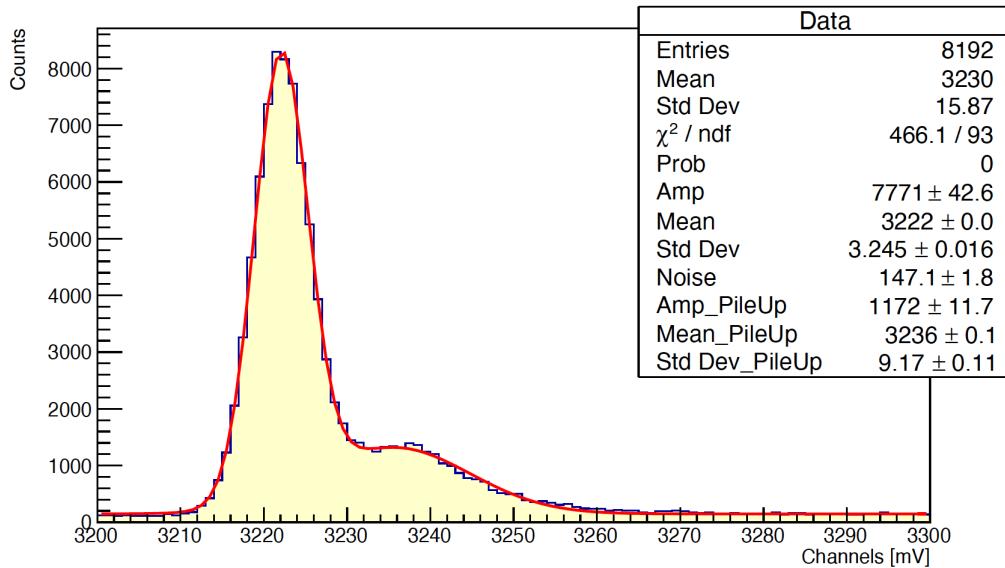


Figura 47: Picco a 1274 keV

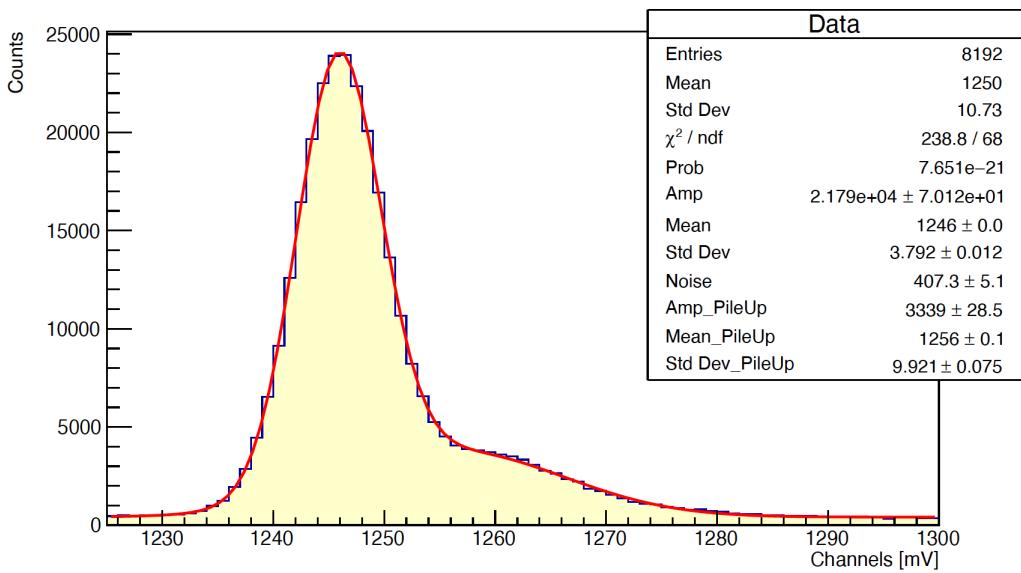


Figura 48: Picco a 511 keV

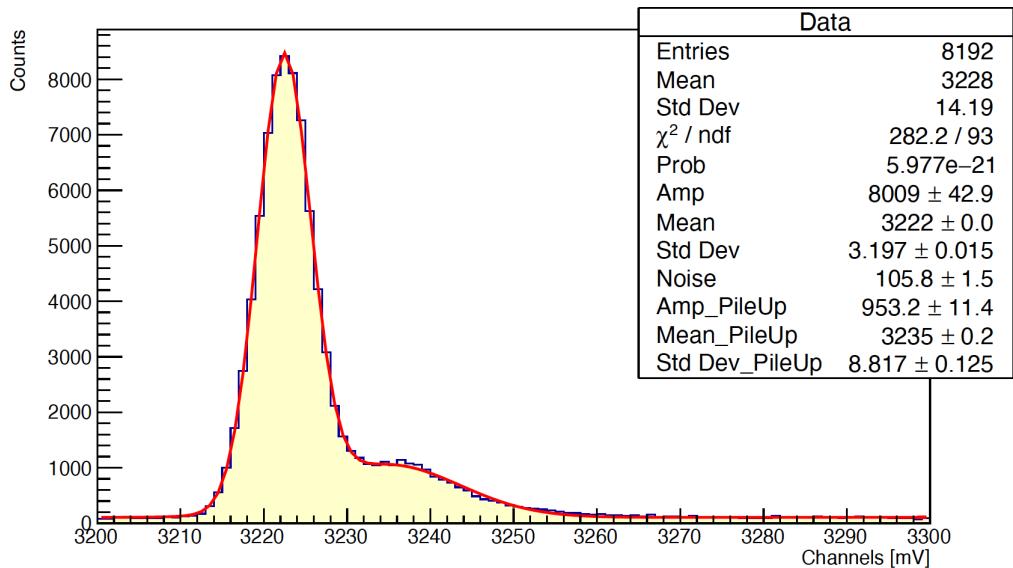


Figura 49: Picco a 1274 keV

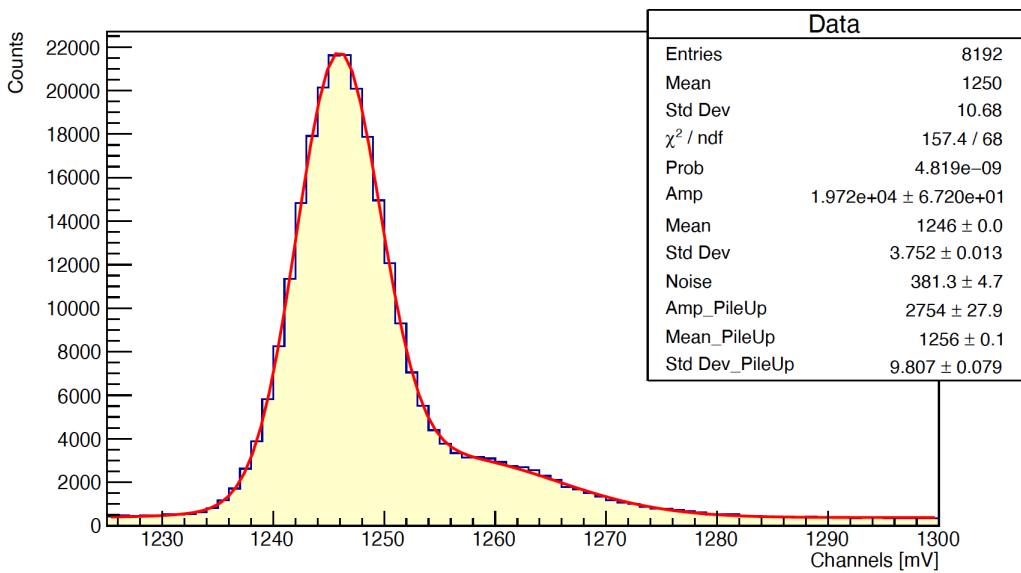


Figura 50: Picco a 511 keV

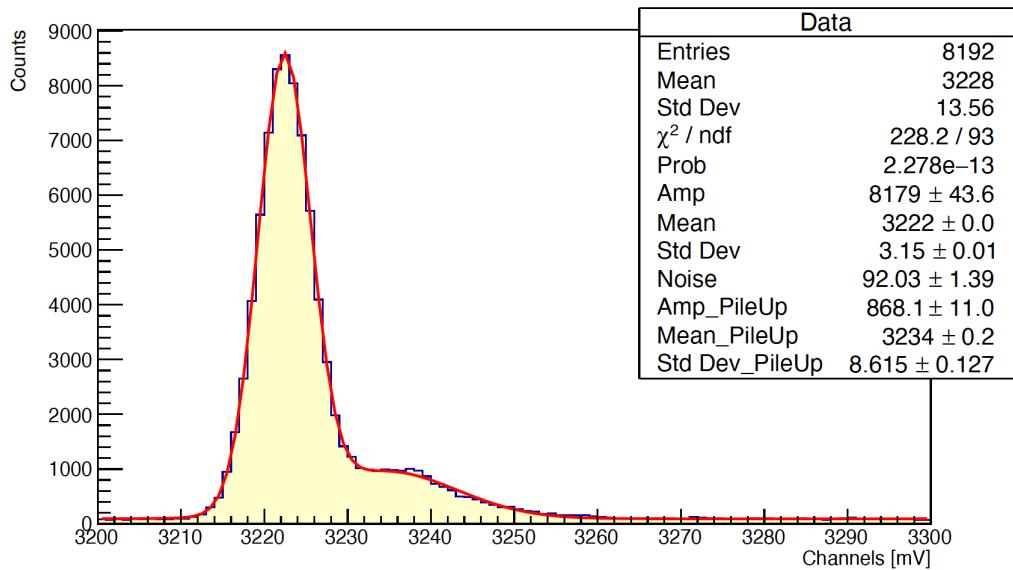


Figura 51: Picco a 1274 keV

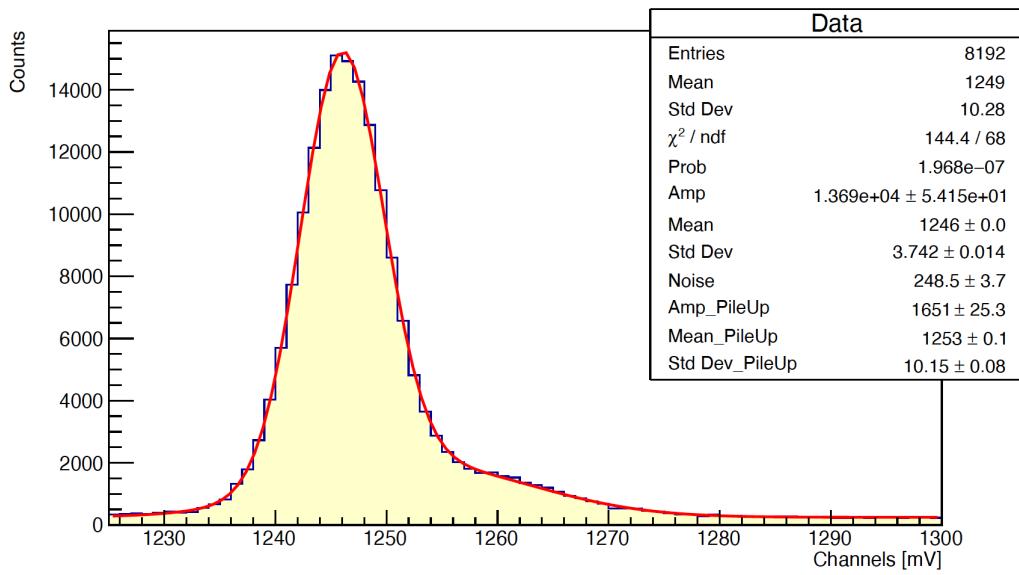


Figura 52: Picco a 511 keV

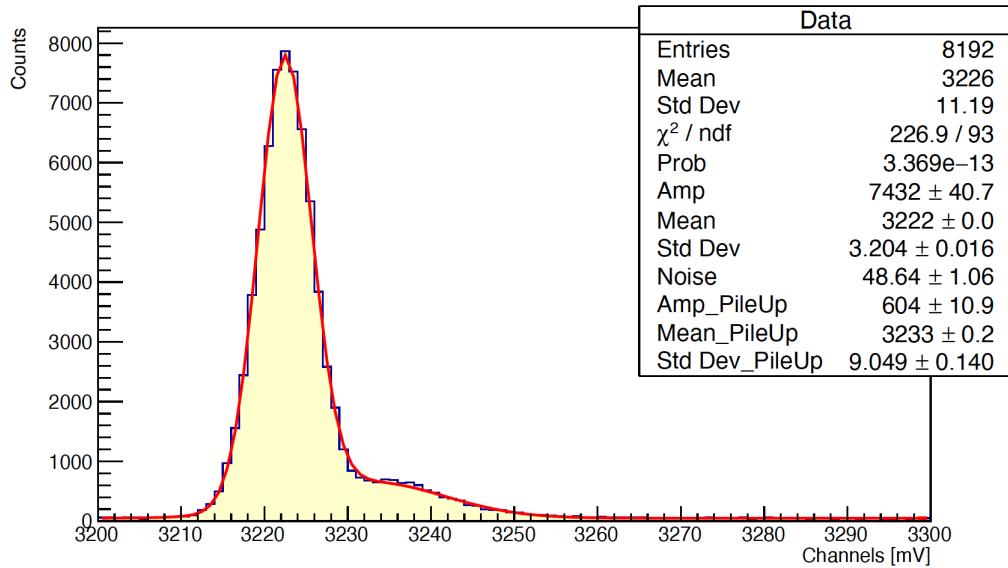


Figura 53: Picco a 1274 keV

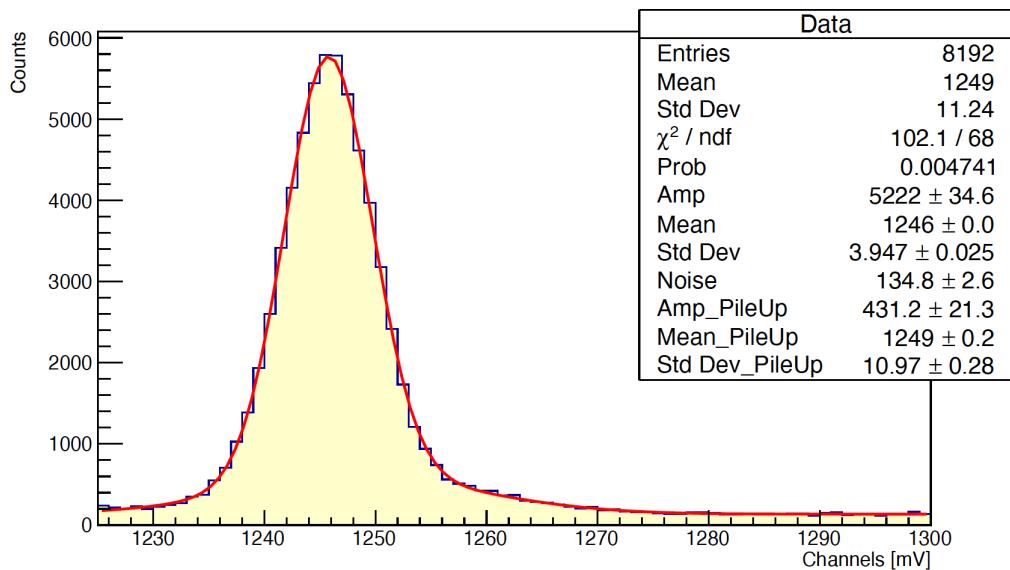


Figura 54: Picco a 511 keV

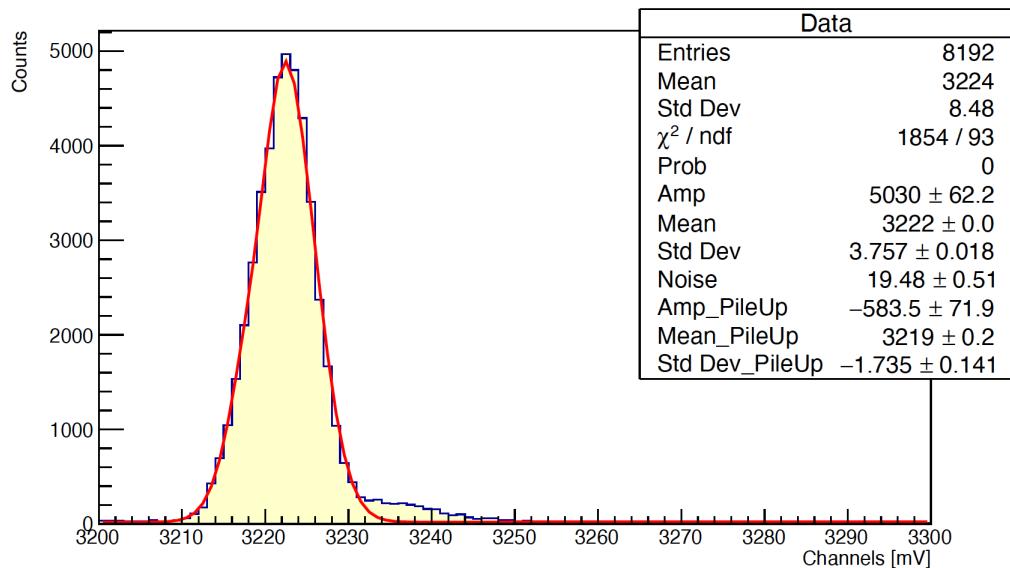


Figura 55: Picco a 1274 keV

4.4 Cobalto con acqua a 4, 8, 12, 16 e 20 cm di spessore

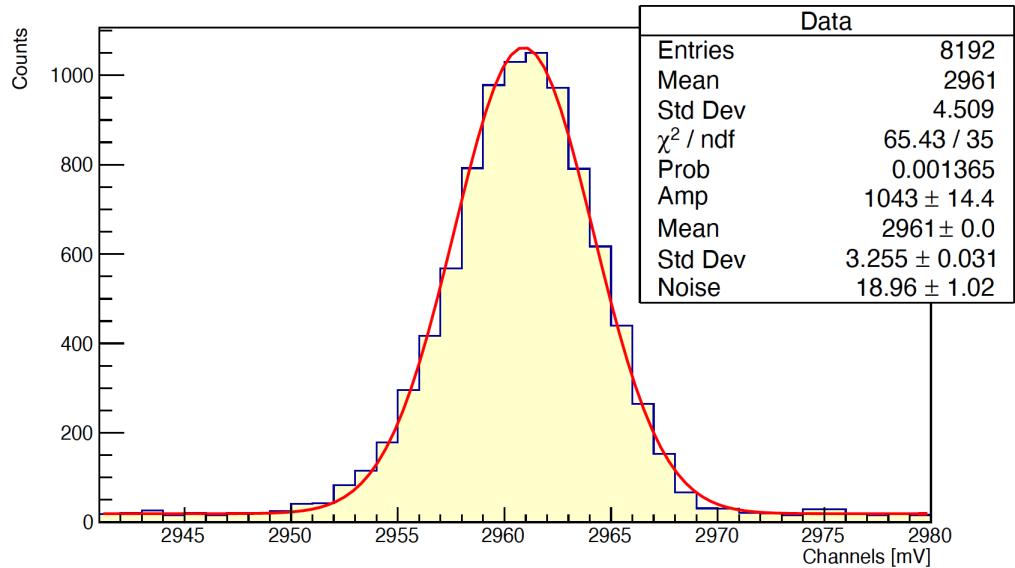


Figura 56: Picco a 1173 keV

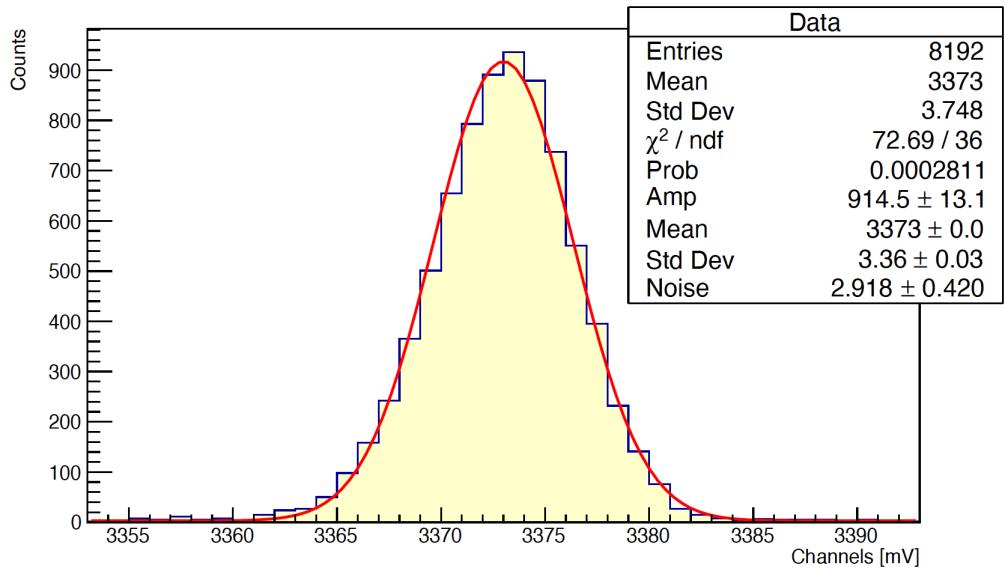


Figura 57: Picco a 1332 keV

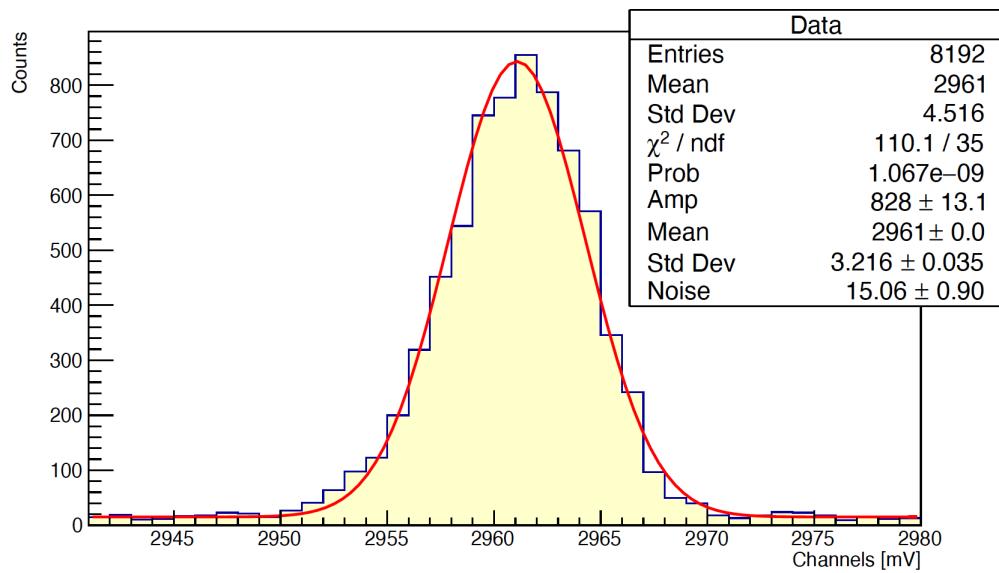


Figura 58: Picco a 1173 keV

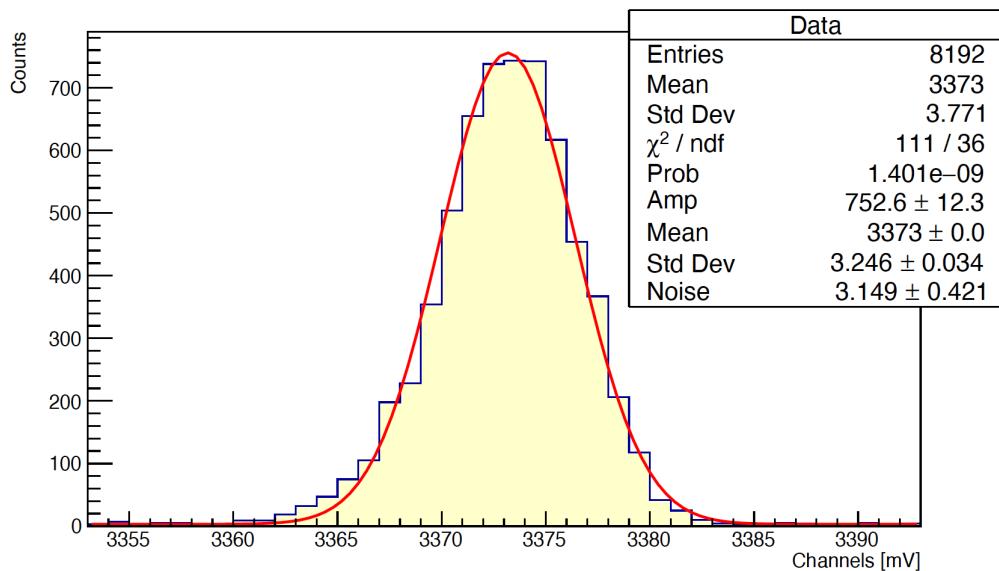


Figura 59: Picco a 1332 keV

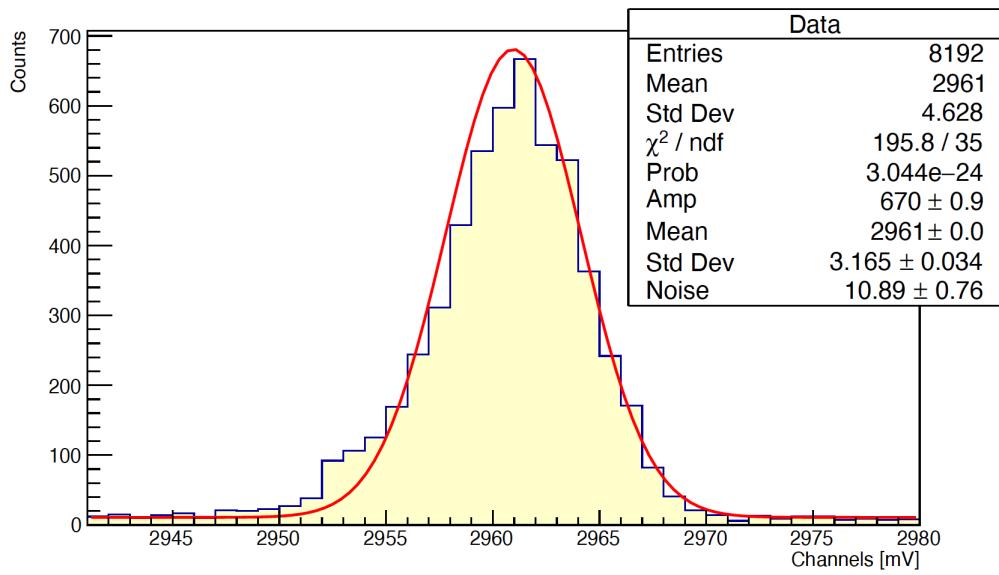


Figura 60: Picco a 1173 keV

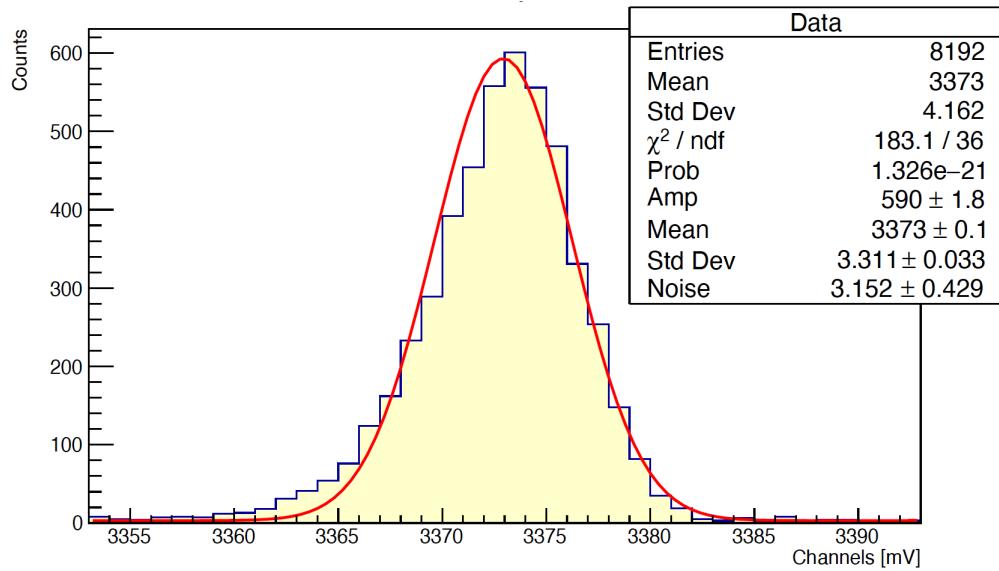


Figura 61: Picco a 1332 keV

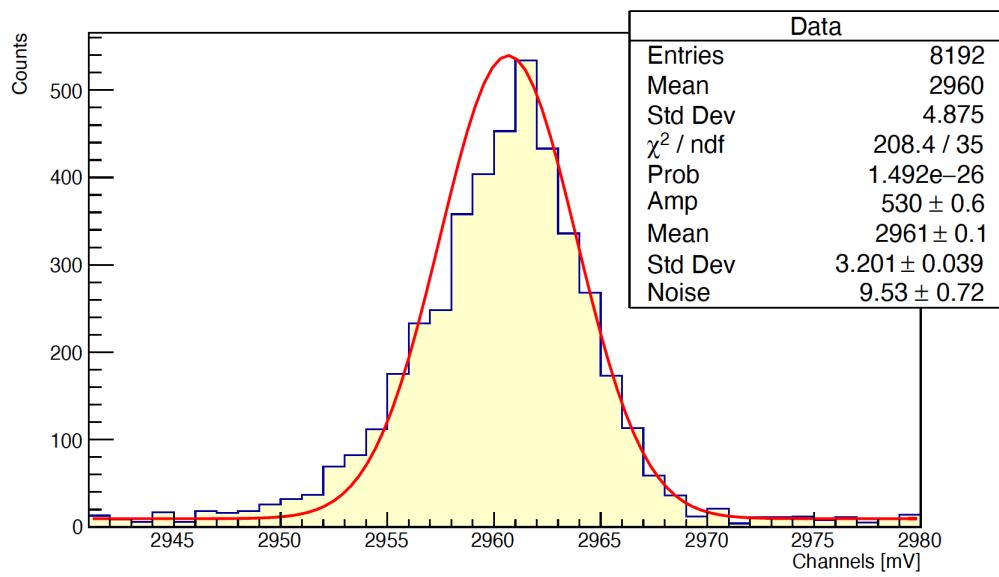


Figura 62: Picco a 1173 keV

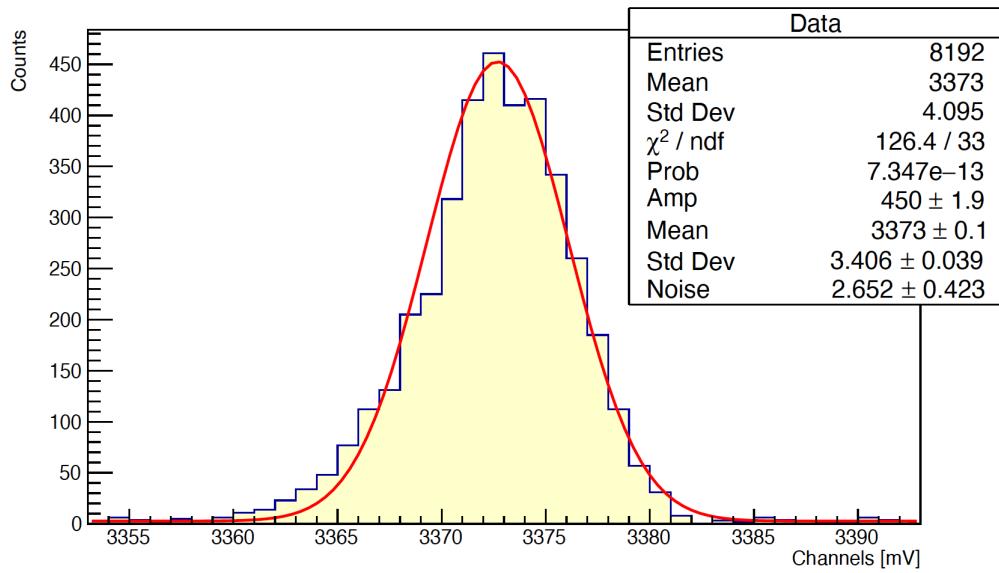


Figura 63: Picco a 1332 keV

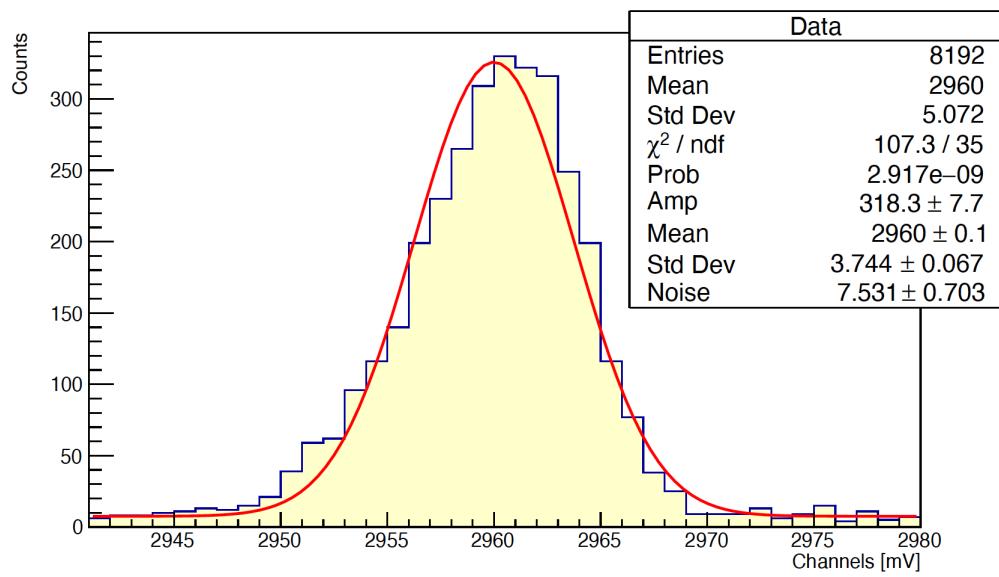


Figura 64: Picco a 1173 keV

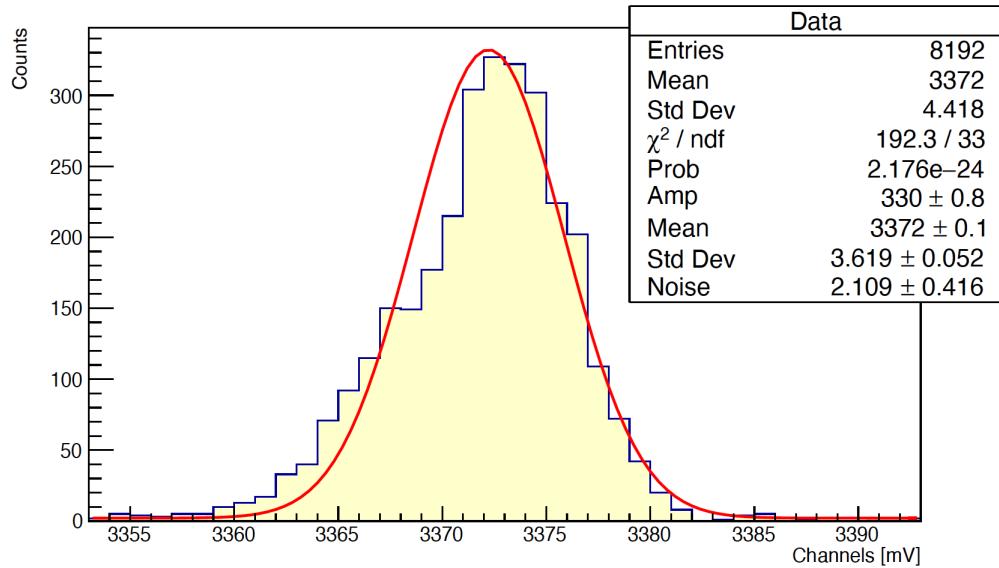


Figura 65: Picco a 1332 keV

4.5 Cobalto con rame a 11, 22, 33, 44 e 54 cm di spessore

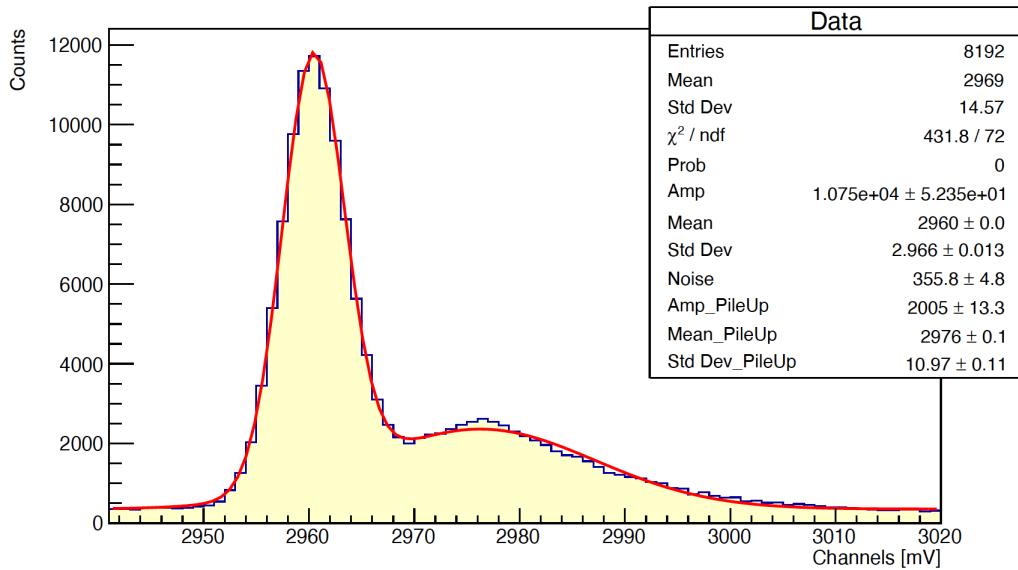


Figura 66: Picco a 1173 keV

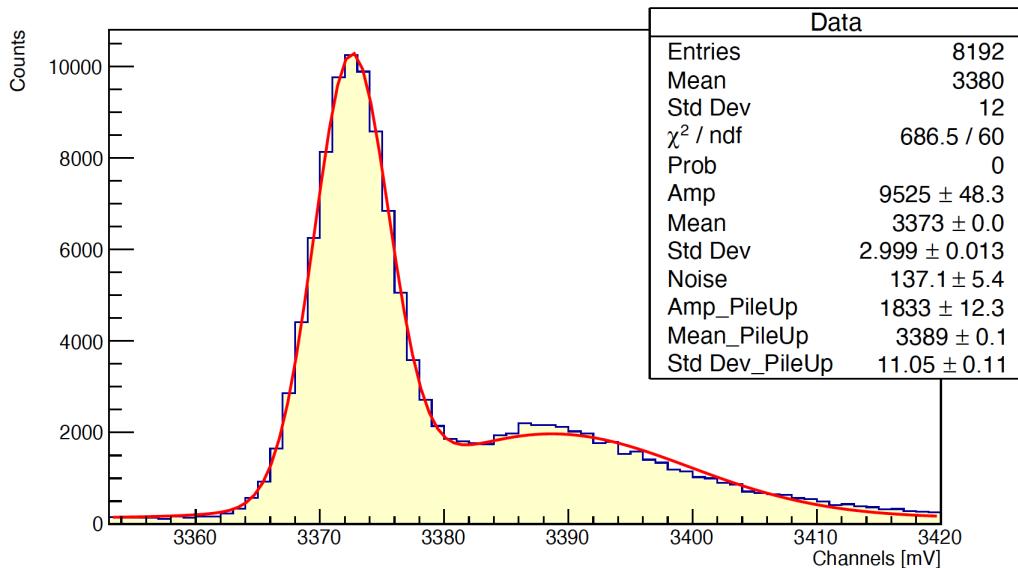


Figura 67: Picco a 1332 keV

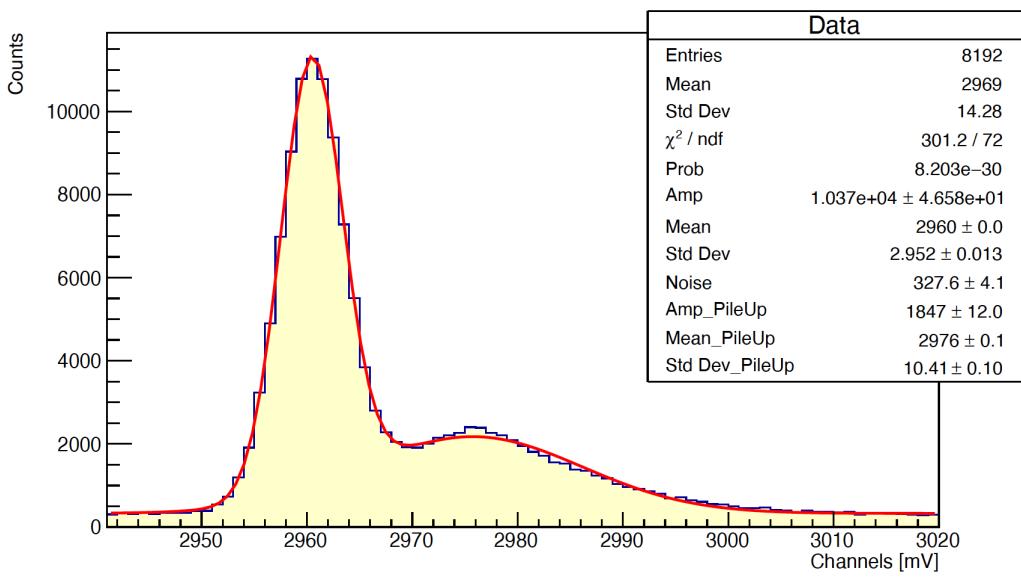


Figura 68: Picco a 1173 keV

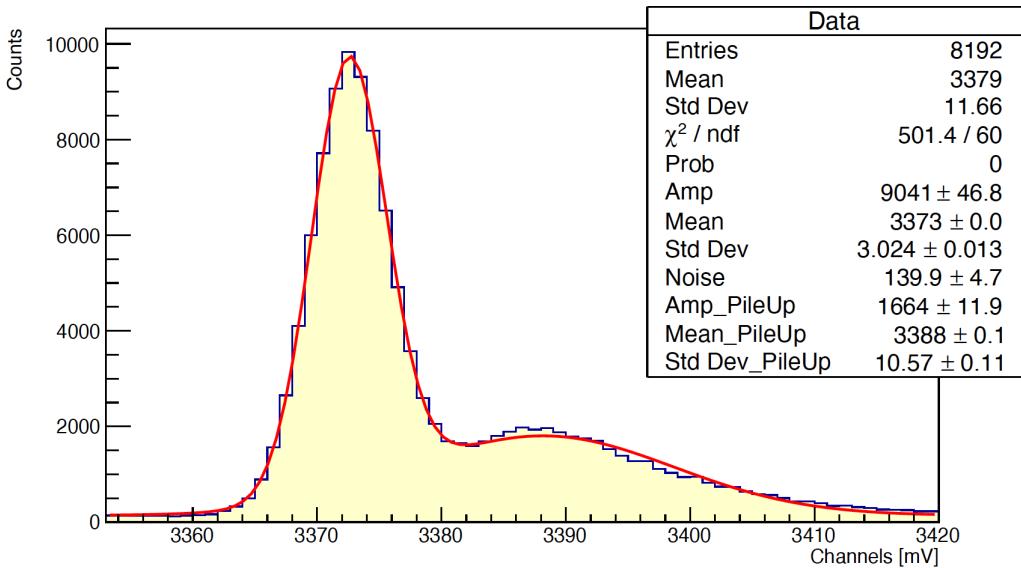


Figura 69: Picco a 1332 keV

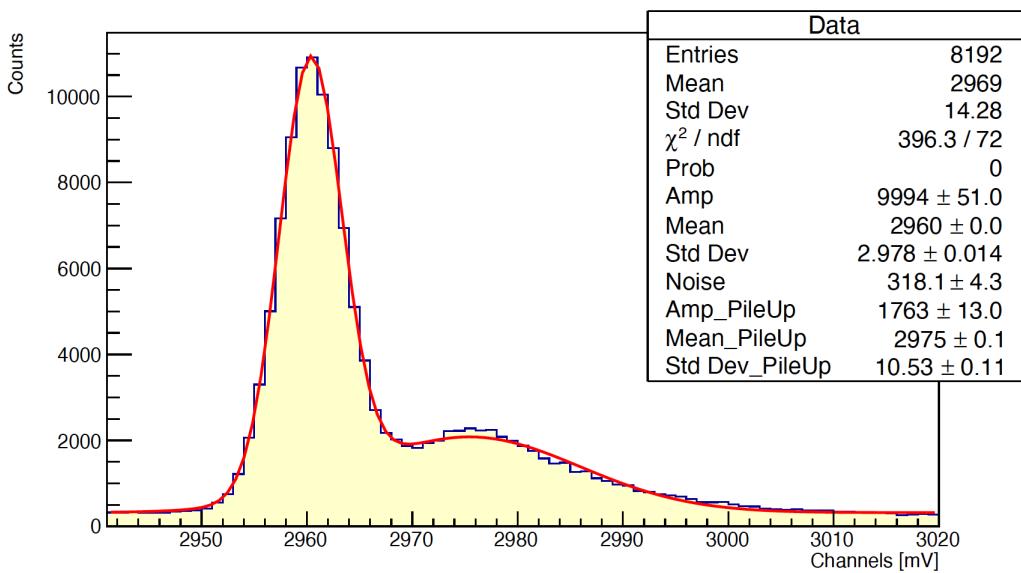


Figura 70: Picco a 1173 keV

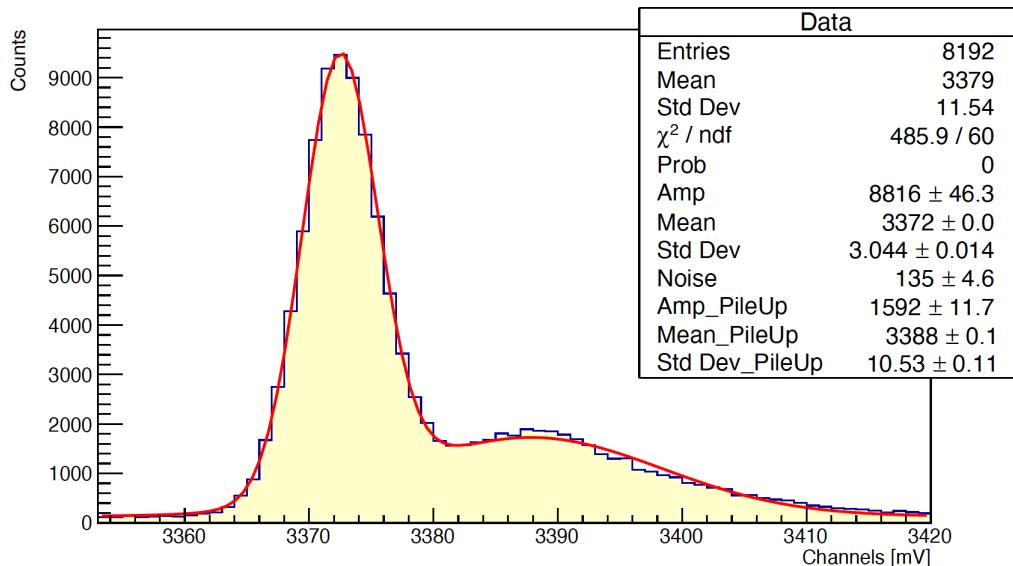


Figura 71: Picco a 1332 keV

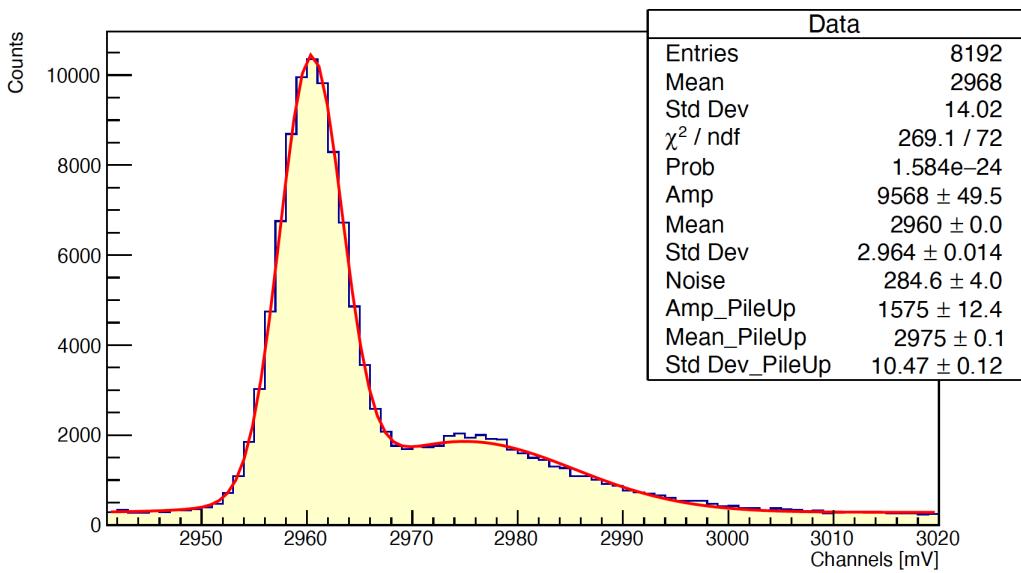


Figura 72: Picco a 1173 keV

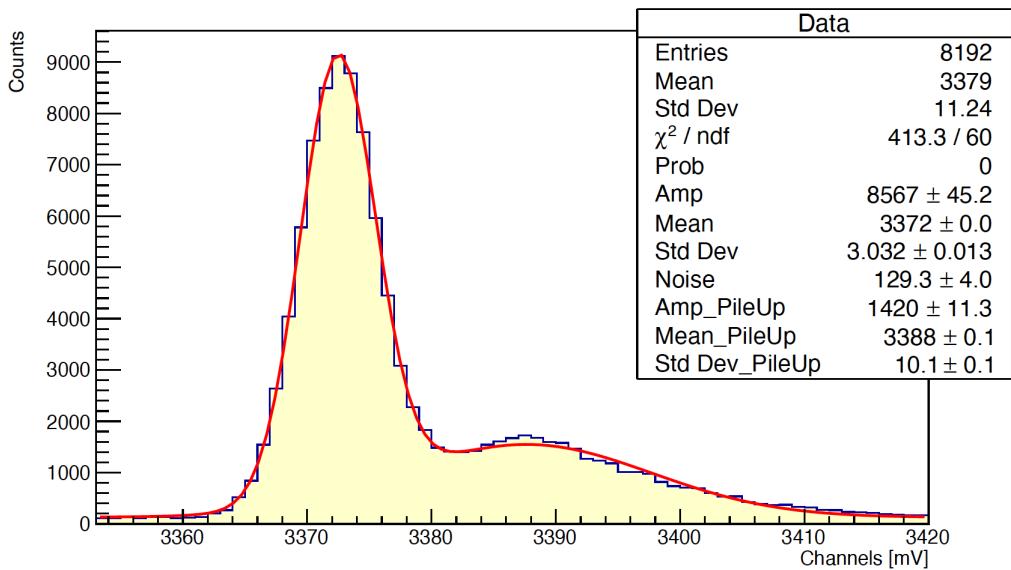


Figura 73: Picco a 1332 keV

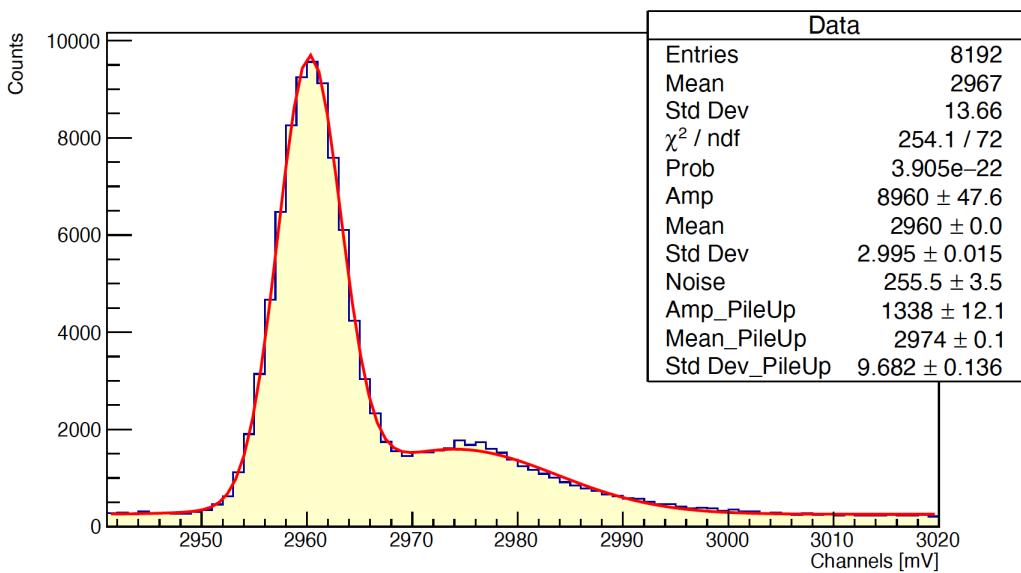


Figura 74: Picco a 1173 keV

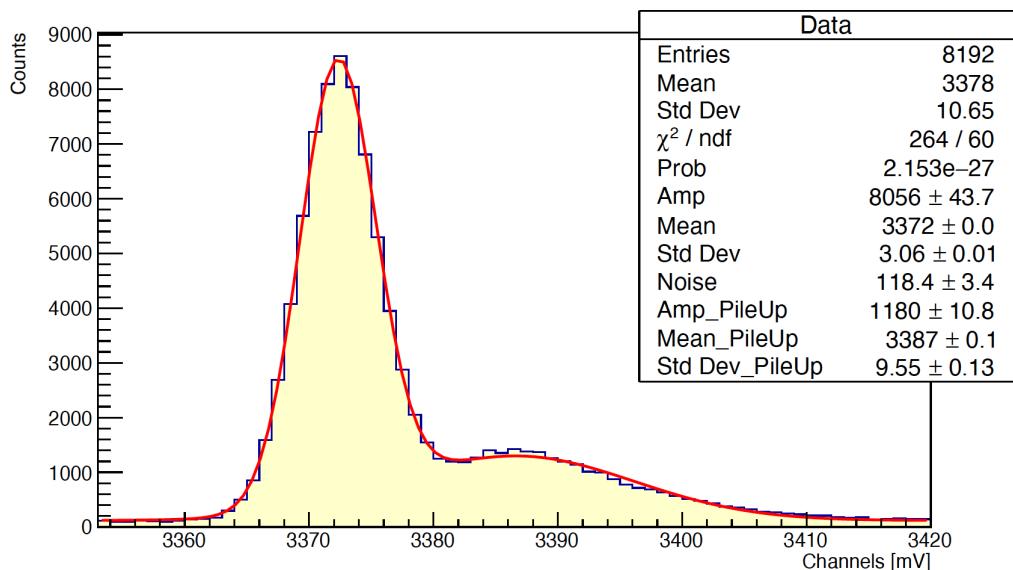


Figura 75: Picco a 1332 keV

4.6 Cobalto con piombo a 1, 21, 33, 58 e 108 cm di spessore

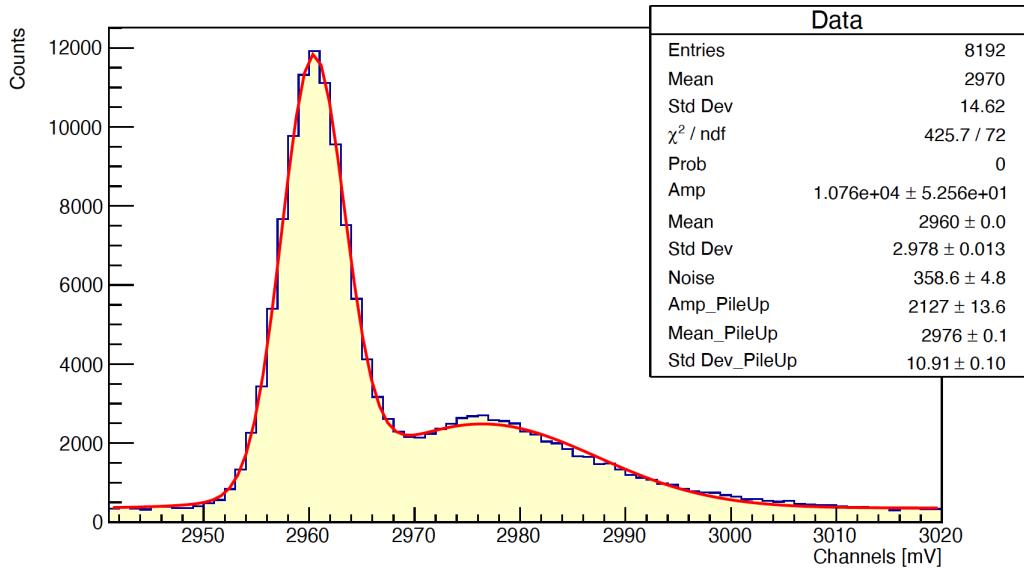


Figura 76: Picco a 1173 keV

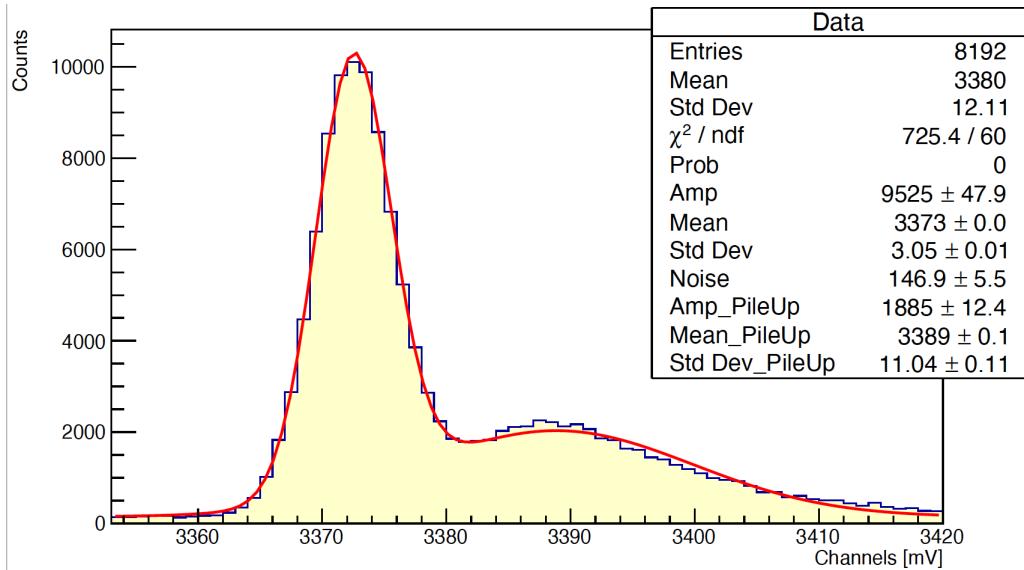


Figura 77: Picco a 1332 keV

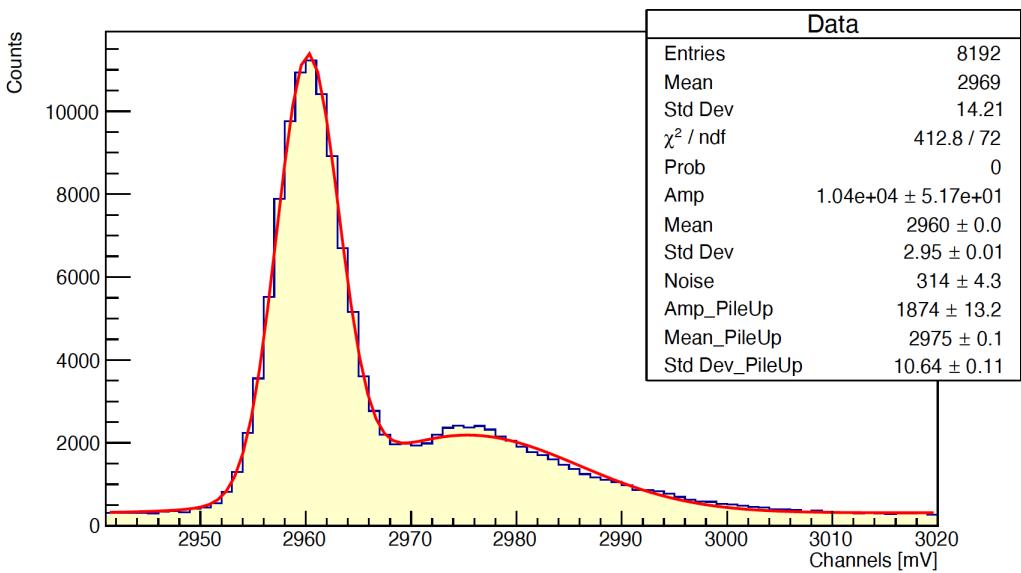


Figura 78: Picco a 1173 keV

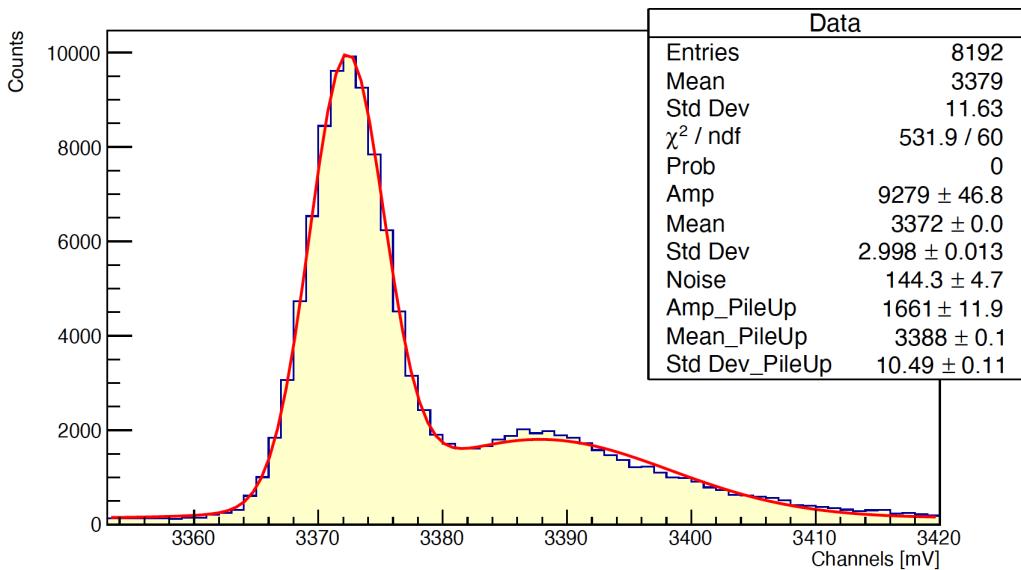


Figura 79: Picco a 1332 keV

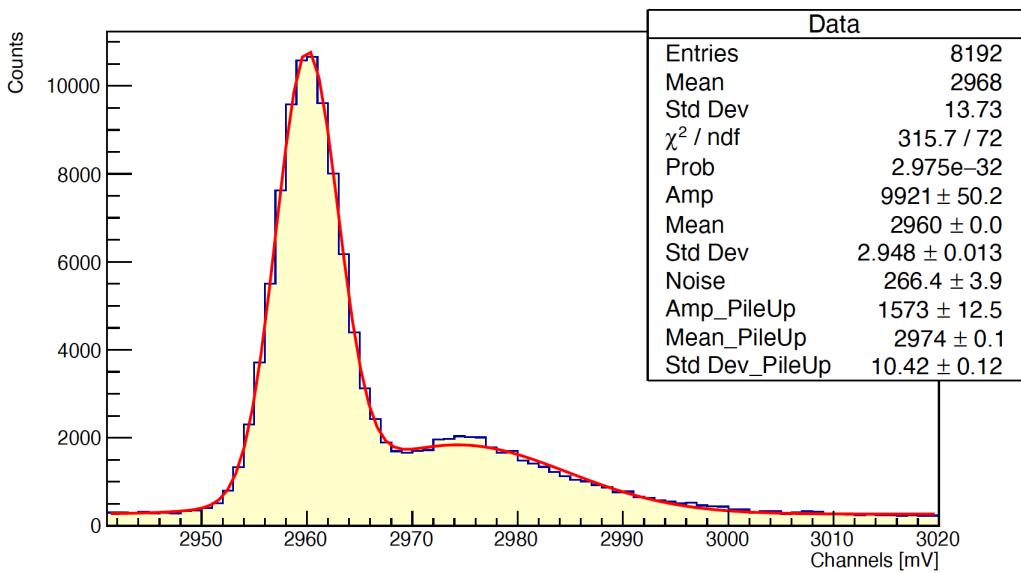


Figura 80: Picco a 1173 keV

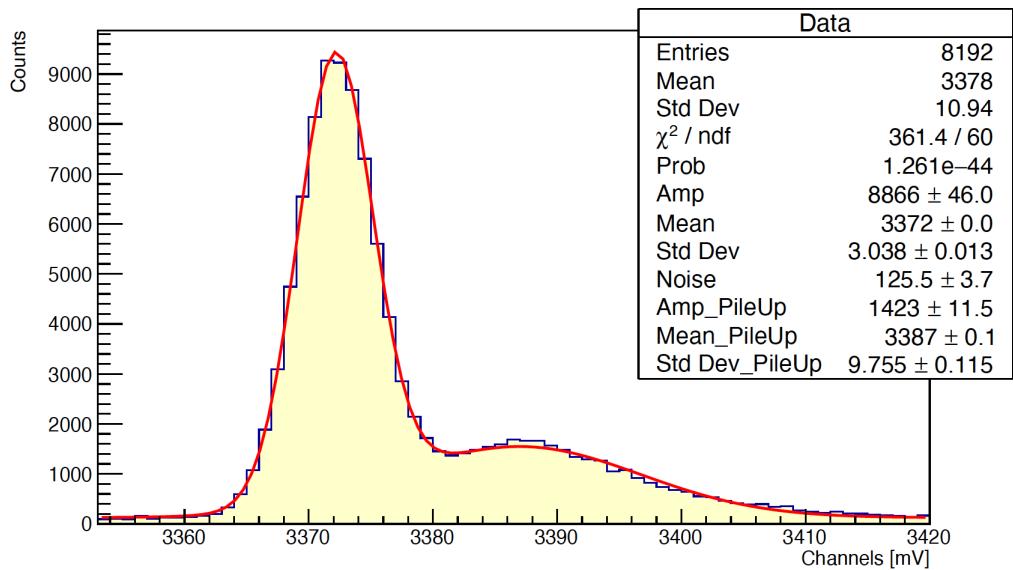


Figura 81: Picco a 1332 keV

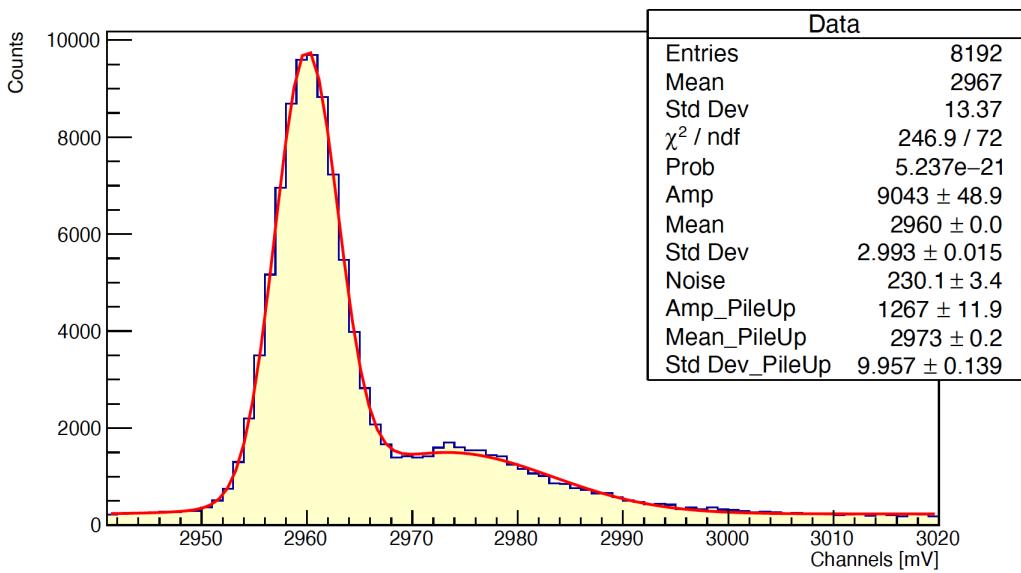


Figura 82: Picco a 1173 keV

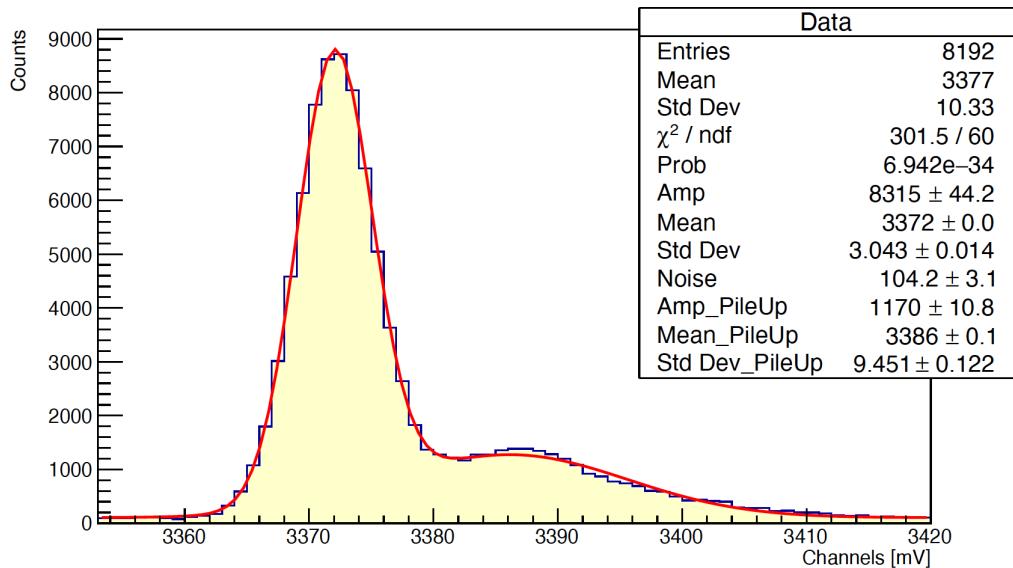


Figura 83: Picco a 1332 keV

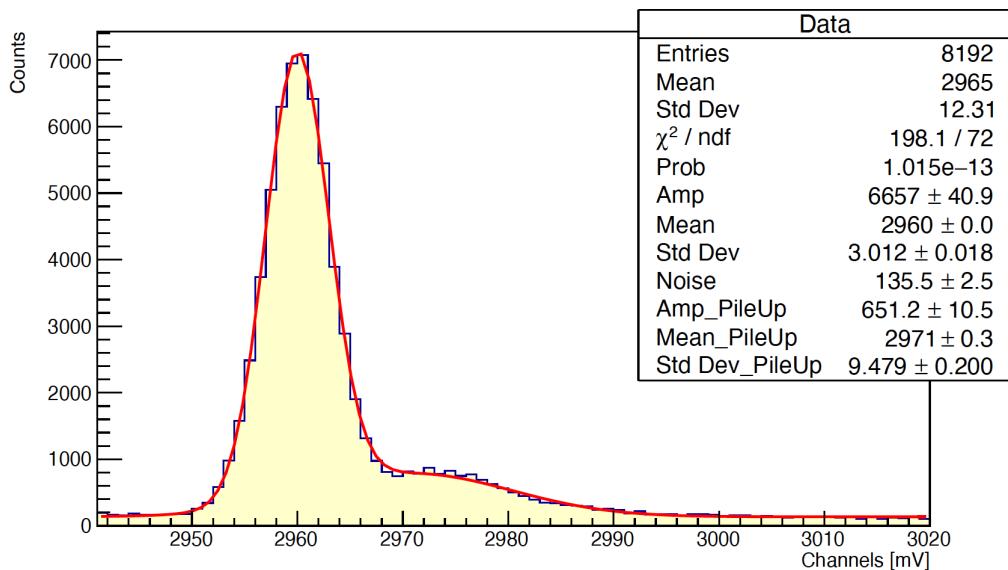


Figura 84: Picco a 1173 keV

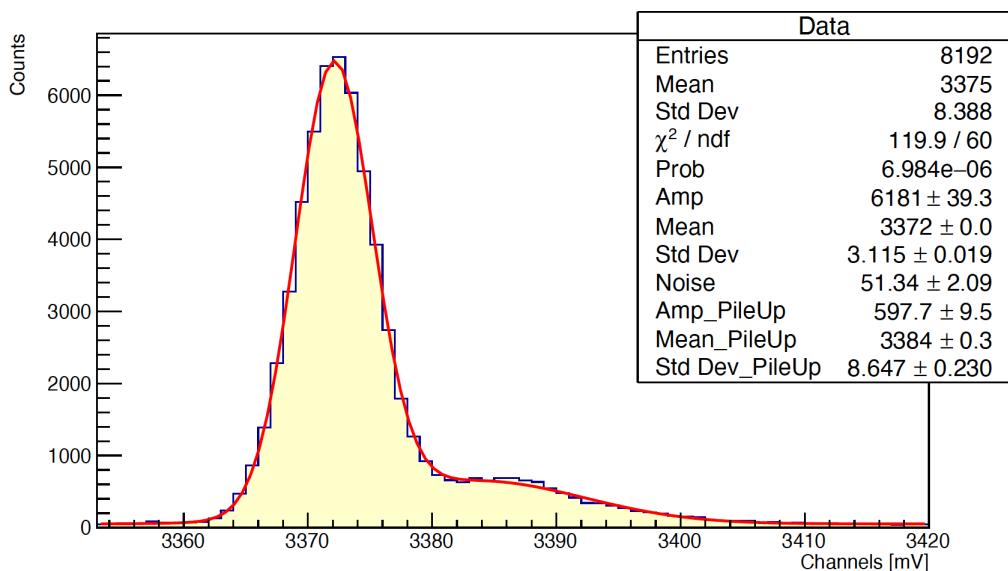


Figura 85: Picco a 1332 keV

4.7 Torio con acqua a 4, 8, 12, 16 e 20 cm di spessore

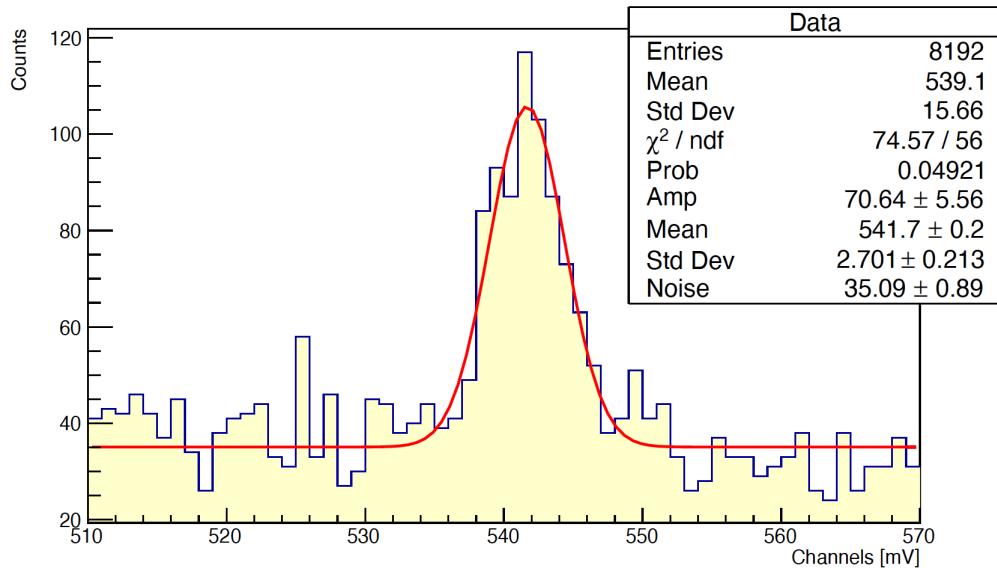


Figura 86: Picco a 238 keV

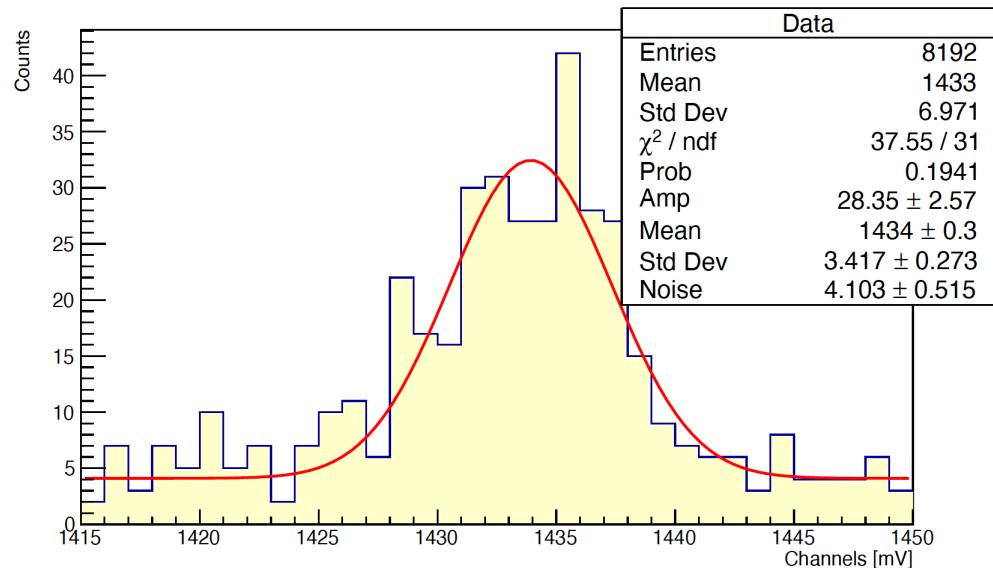


Figura 87: Picco a 583 keV

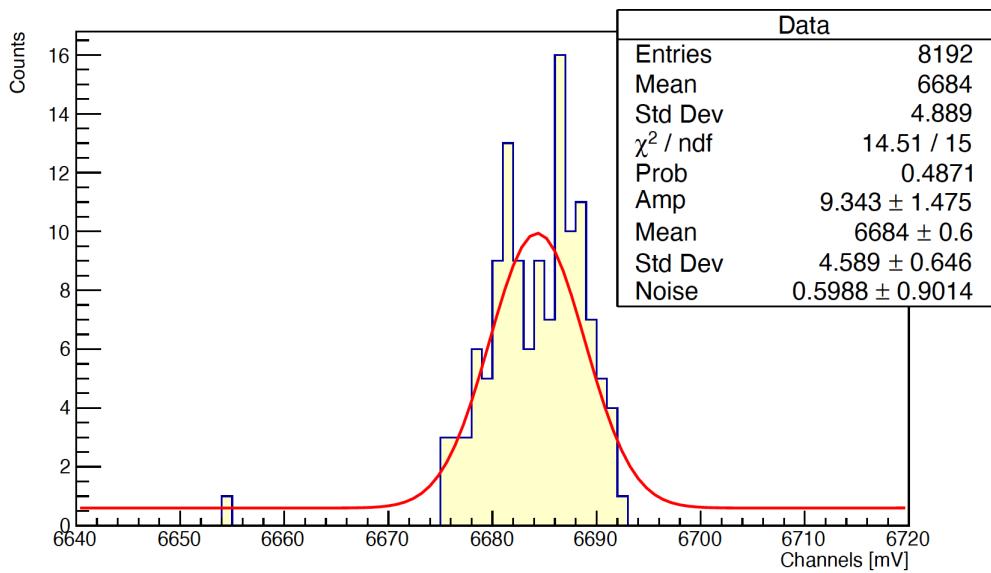


Figura 88: Picco a 2614 keV

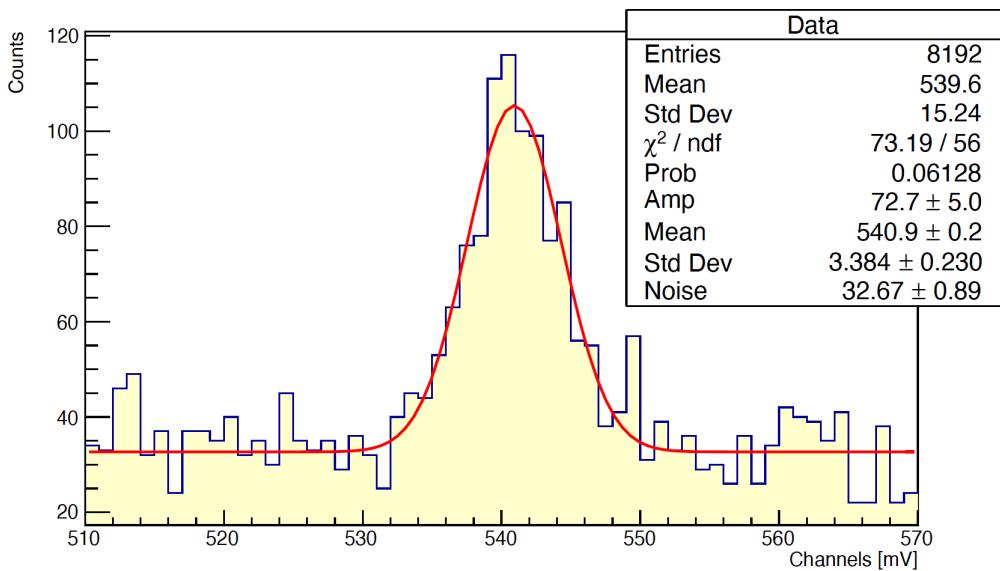


Figura 89: Picco a 238 keV

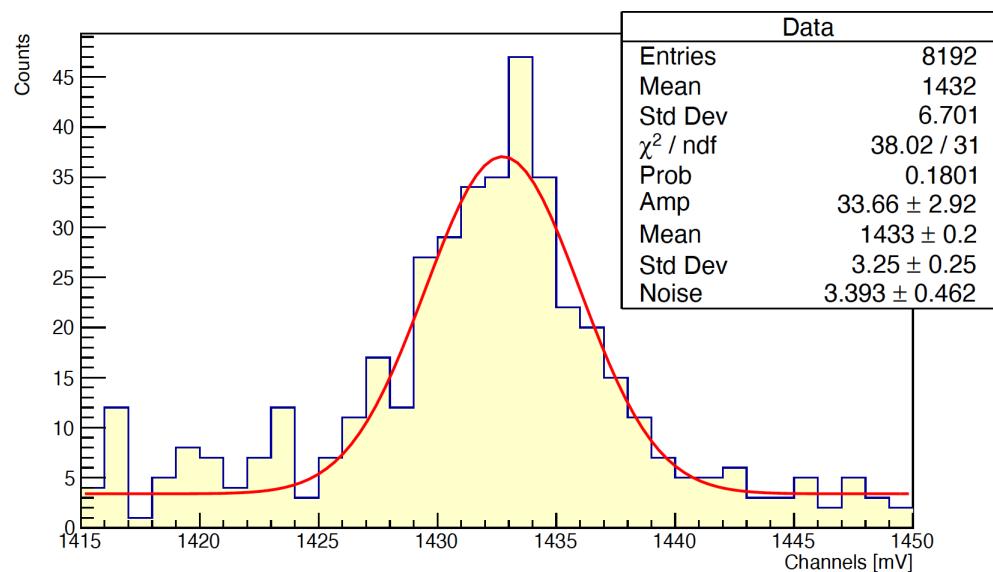


Figura 90: Picco a 583 keV

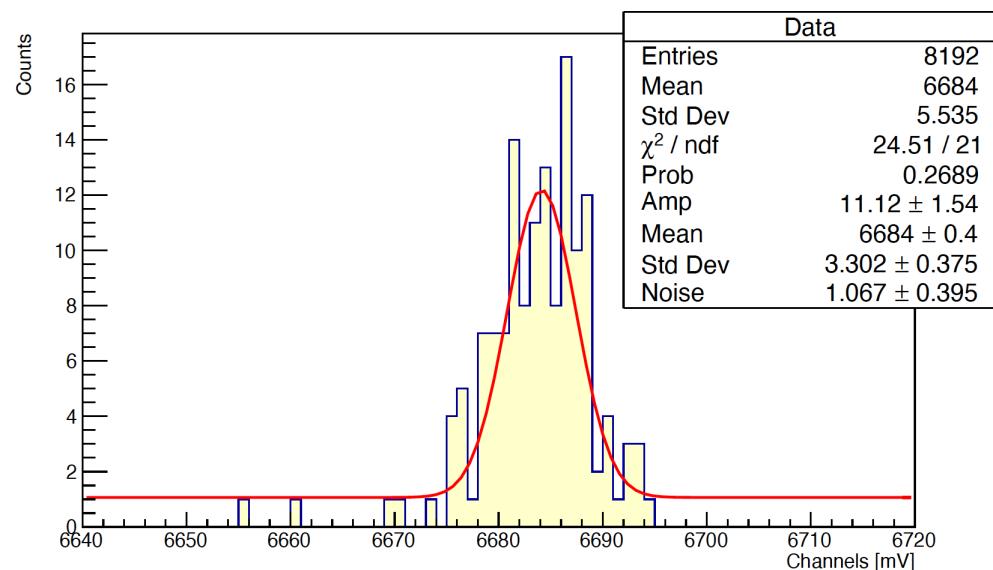


Figura 91: Picco a 2614 keV

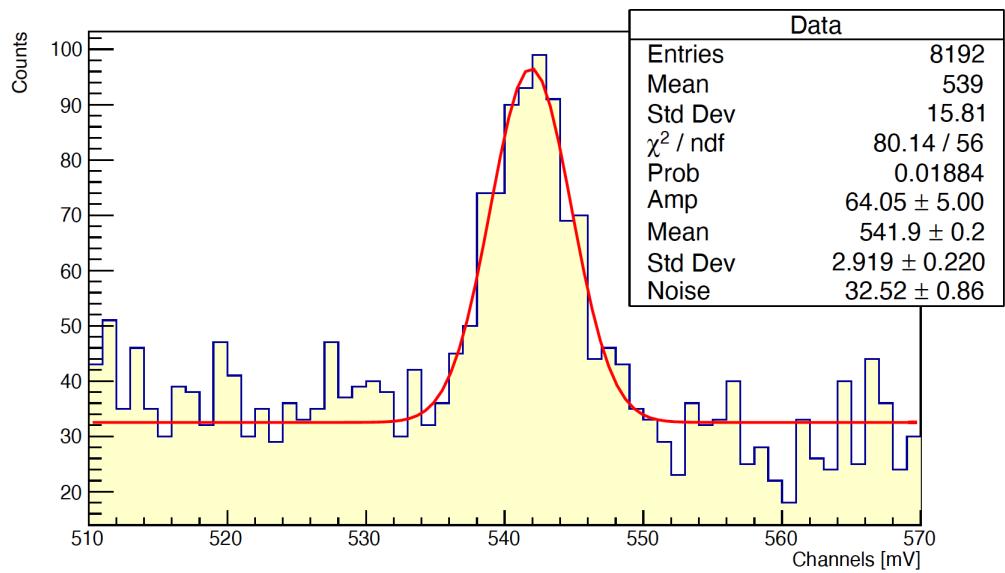


Figura 92: Picco a 238 keV

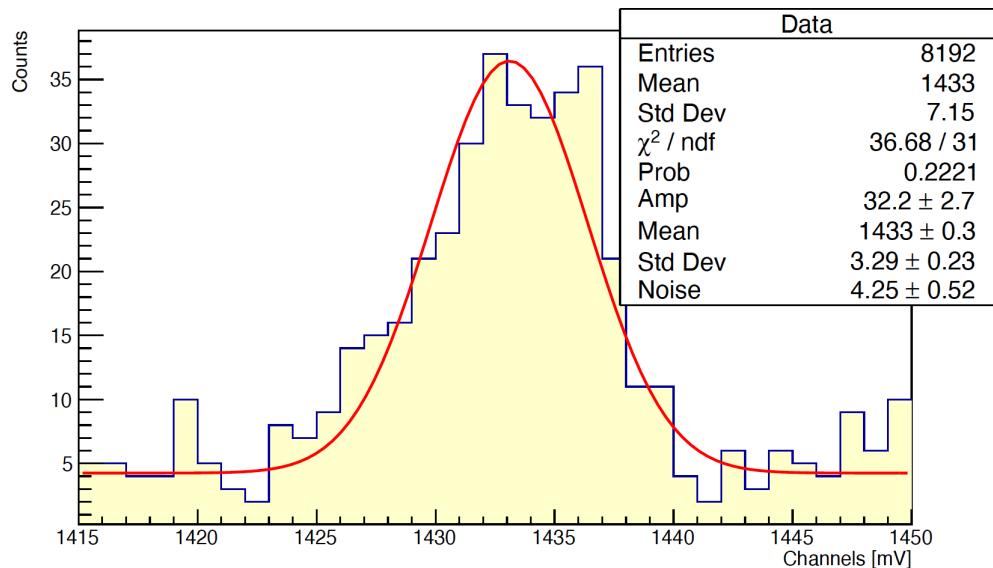


Figura 93: Picco a 583 keV

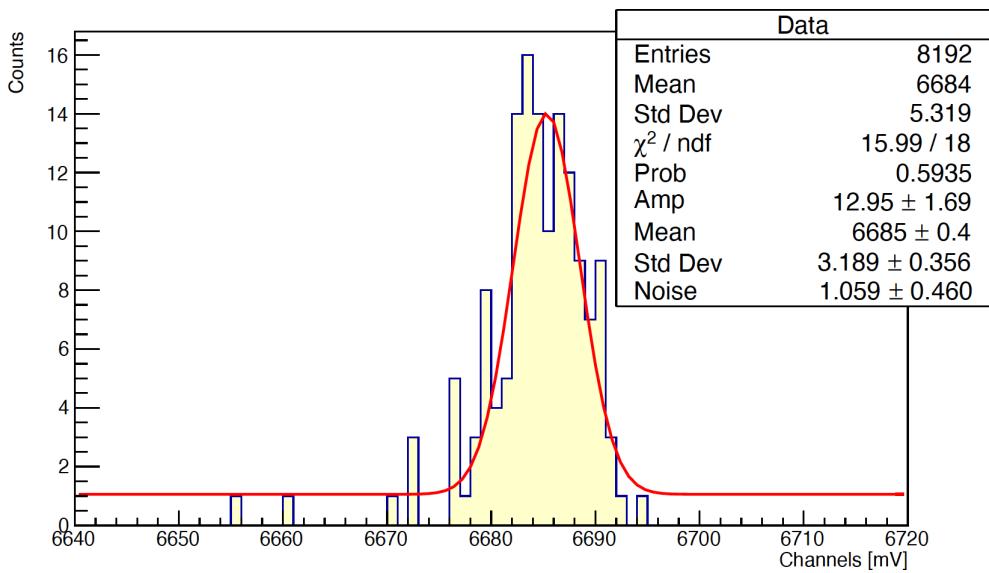


Figura 94: Picco a 2614 keV

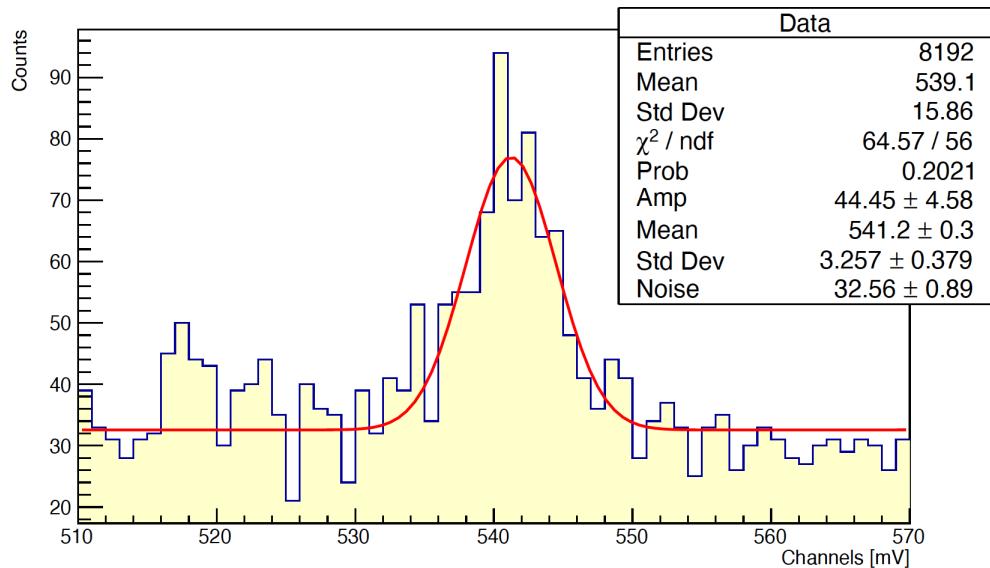


Figura 95: Picco a 238 keV

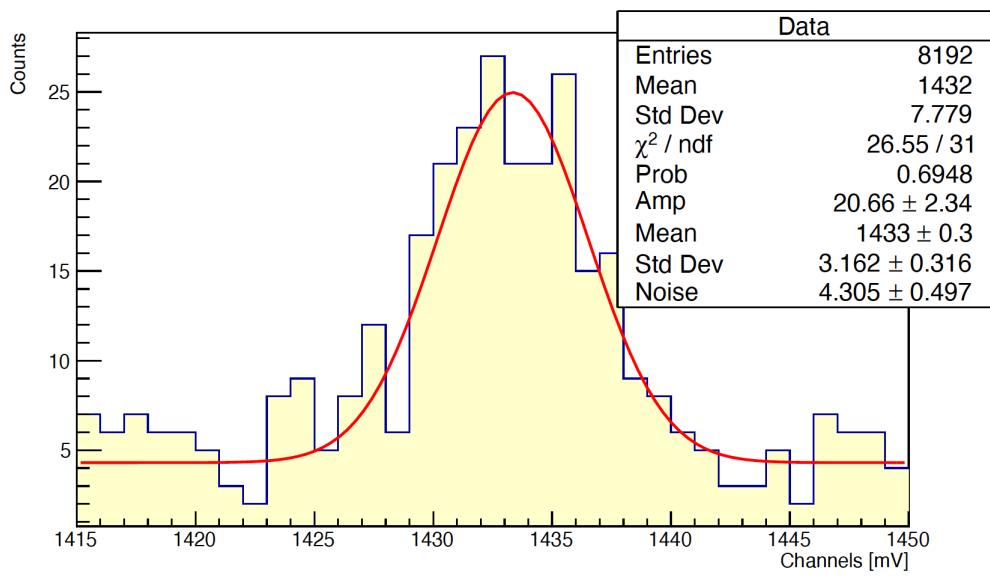


Figura 96: Picco a 583 keV

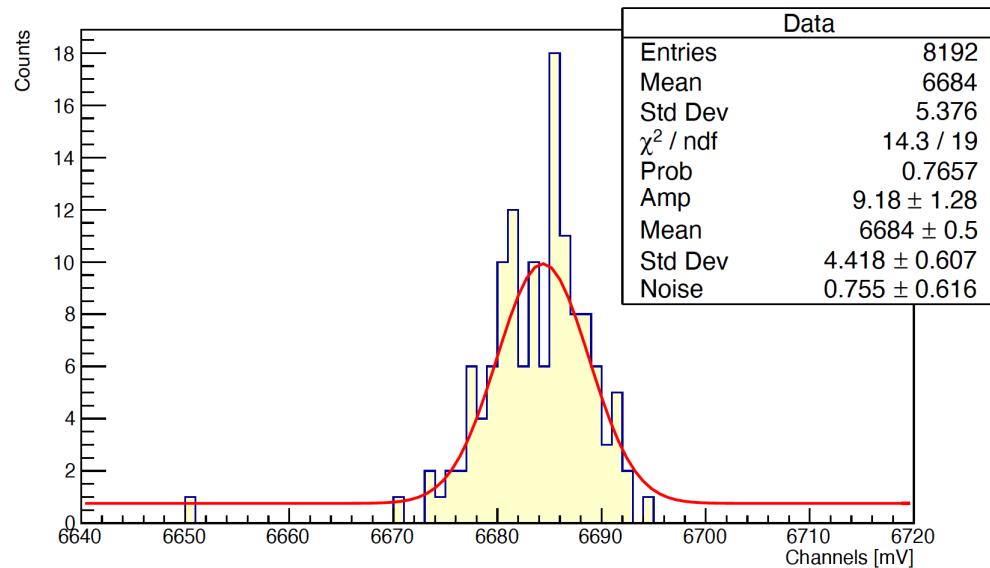


Figura 97: Picco a 2614 keV

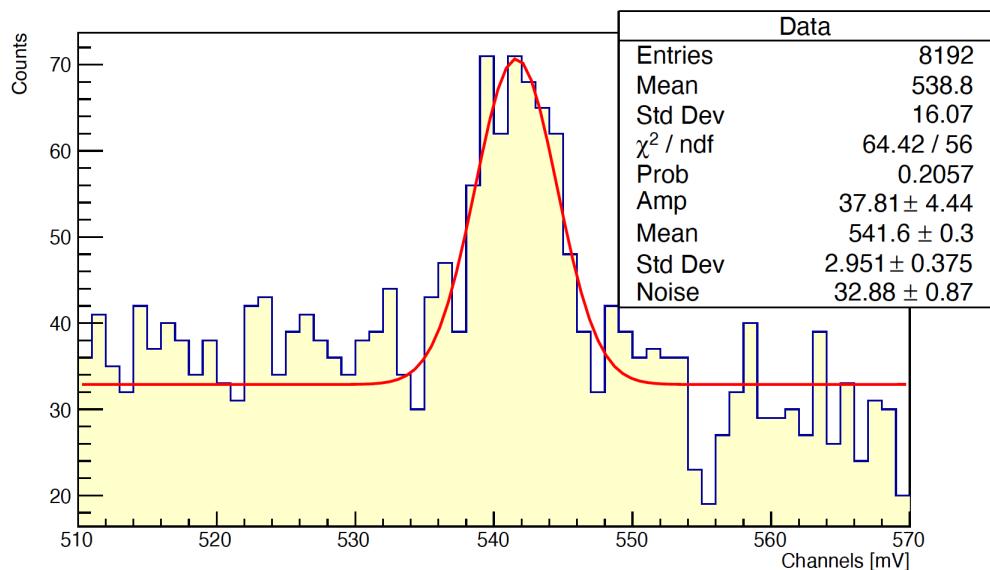


Figura 98: Picco a 238 keV

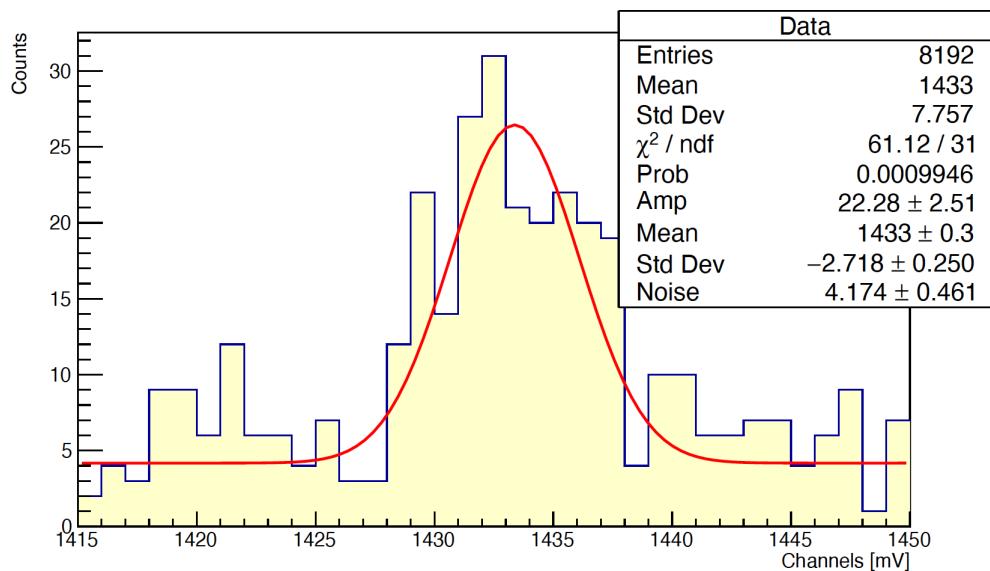


Figura 99: Picco a 583 keV

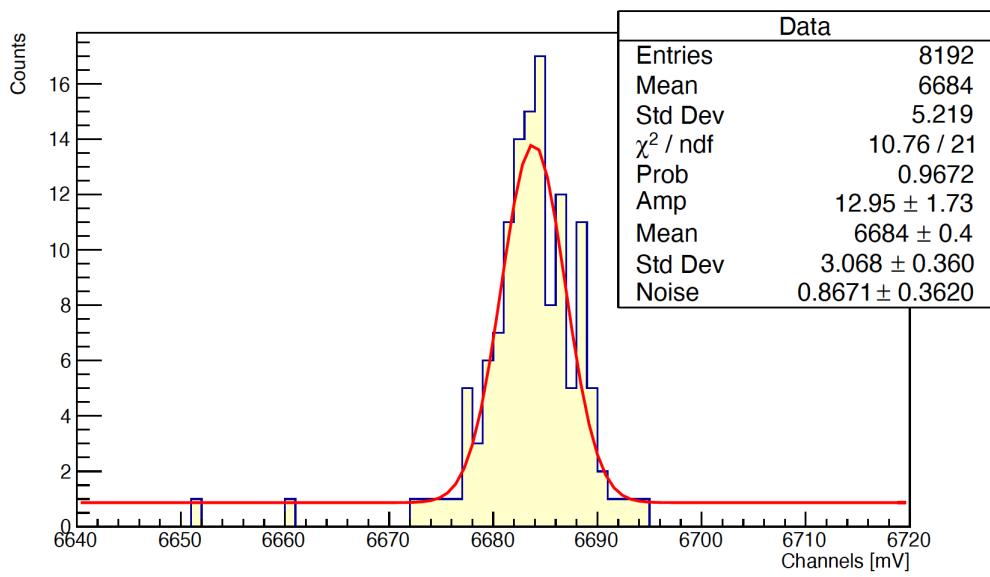


Figura 100: Picco a 2614 keV

4.8 Torio con rame a 11, 22, 33, 44 e 54 cm di spessore

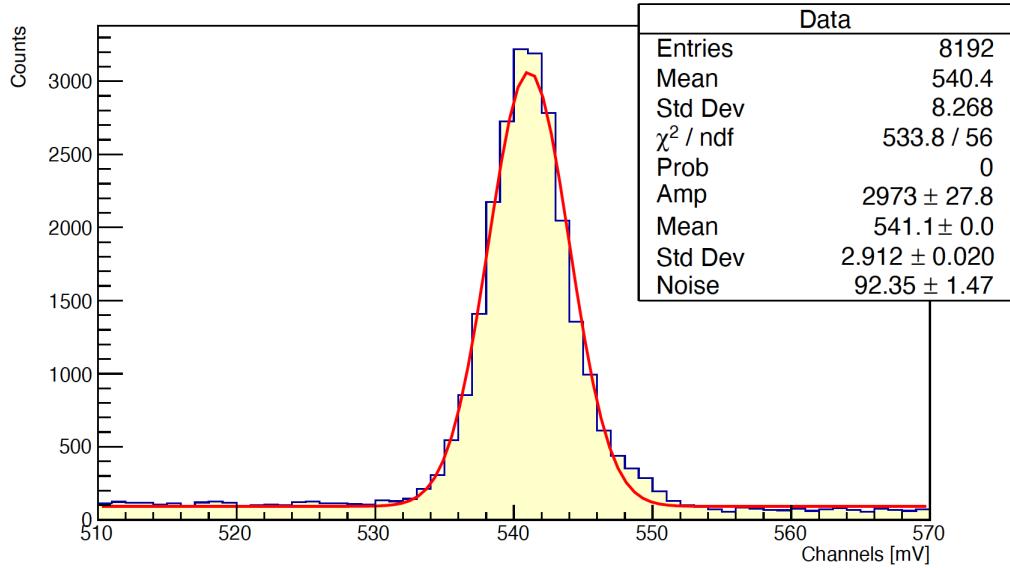


Figura 101: Picco a 238 keV

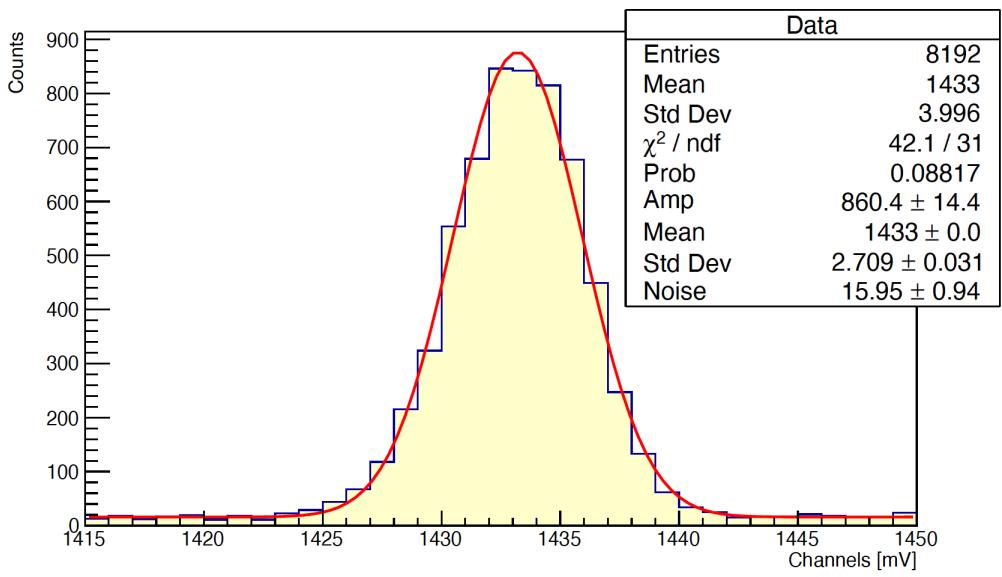


Figura 102: Picco a 583 keV

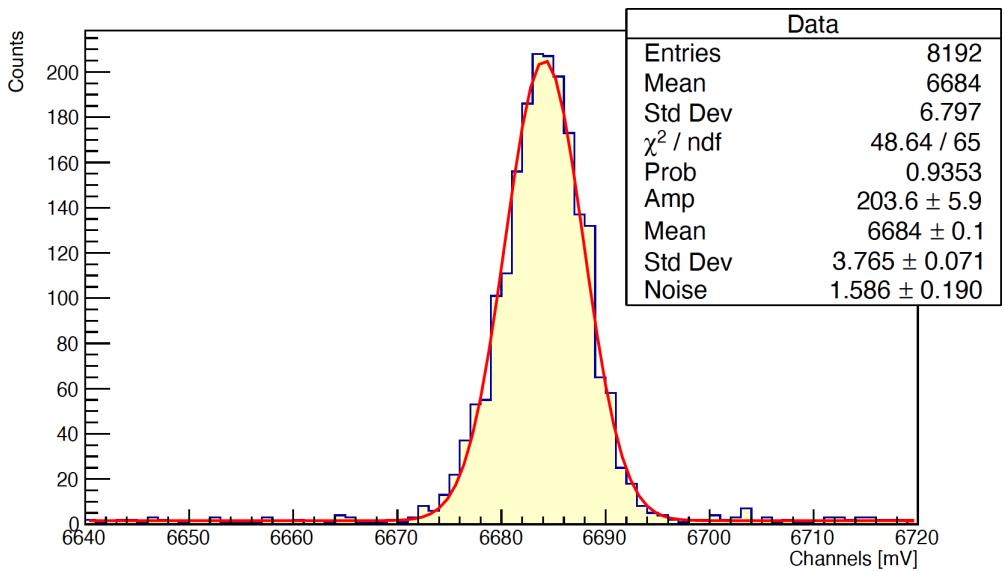


Figura 103: Picco a 2614 keV

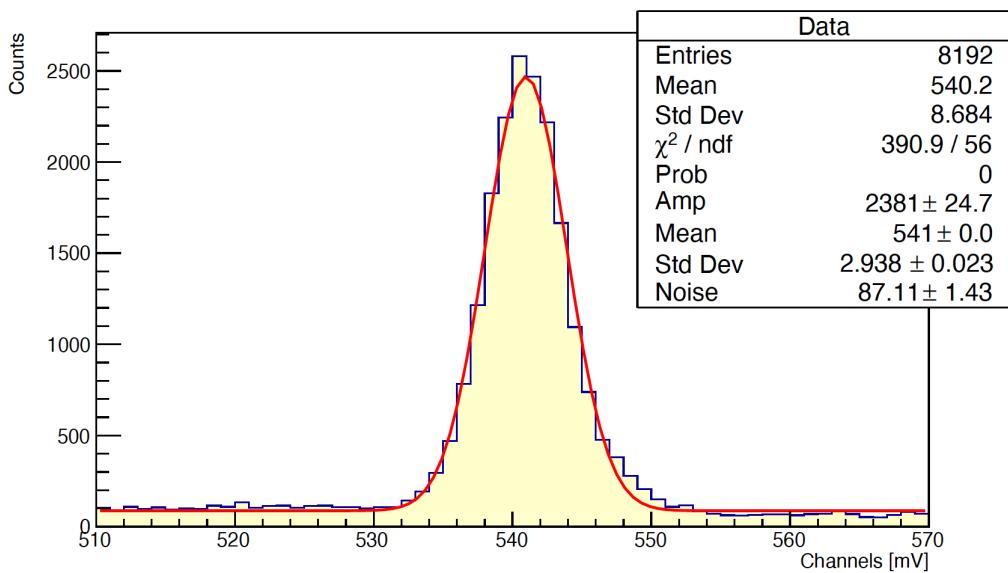


Figura 104: Picco a 238 keV

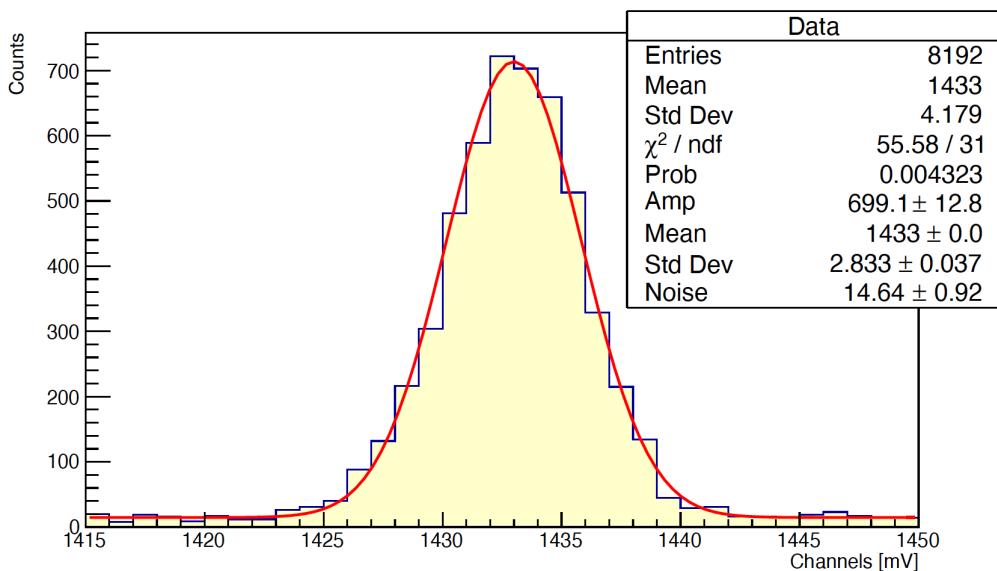


Figura 105: Picco a 583 keV

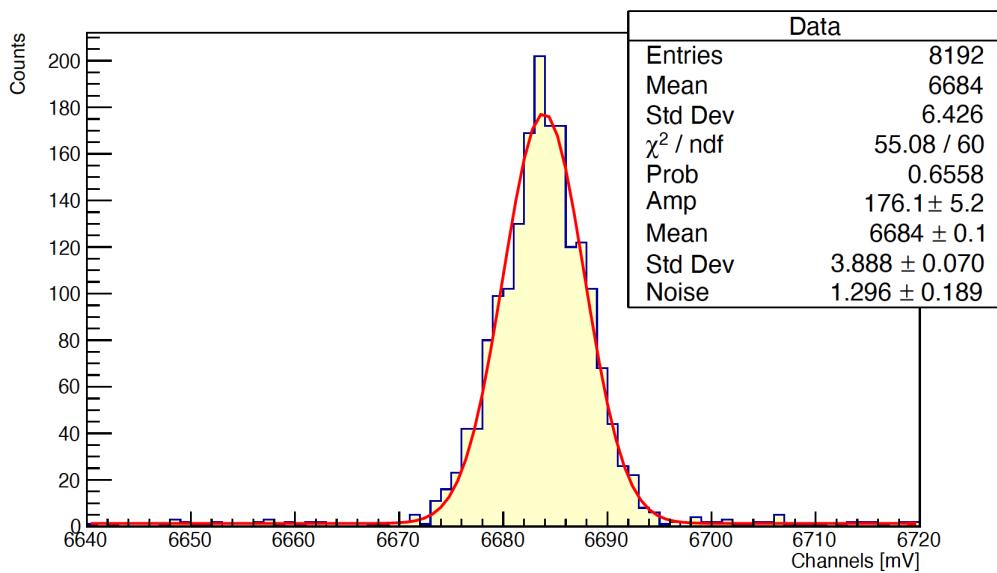


Figura 106: Picco a 2614 keV

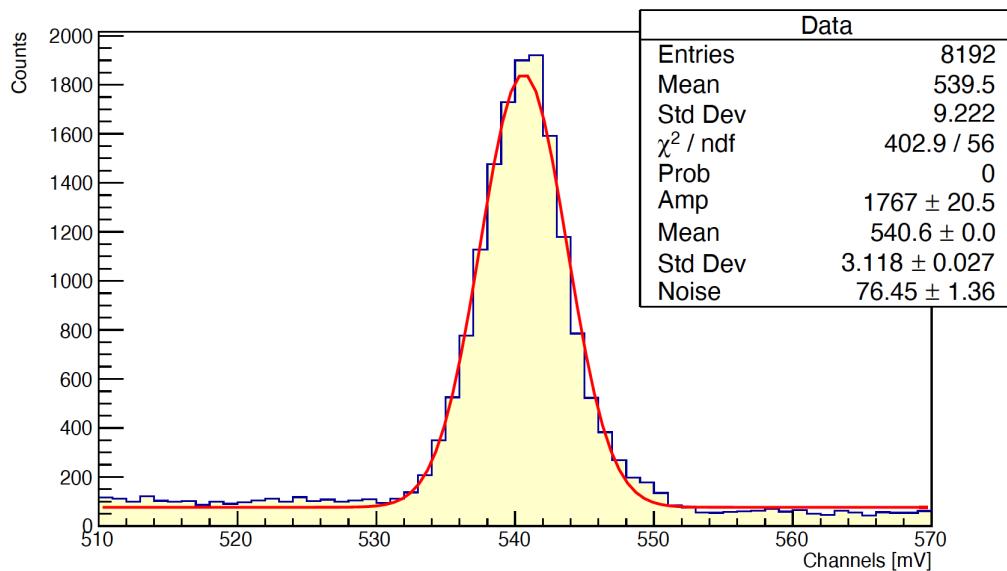


Figura 107: Picco a 238 keV

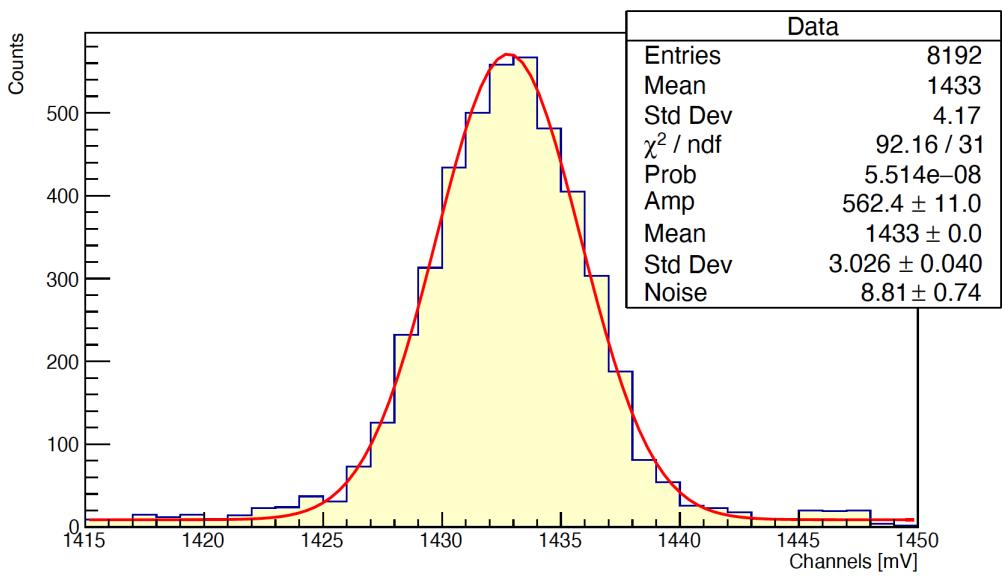


Figura 108: Picco a 583 keV

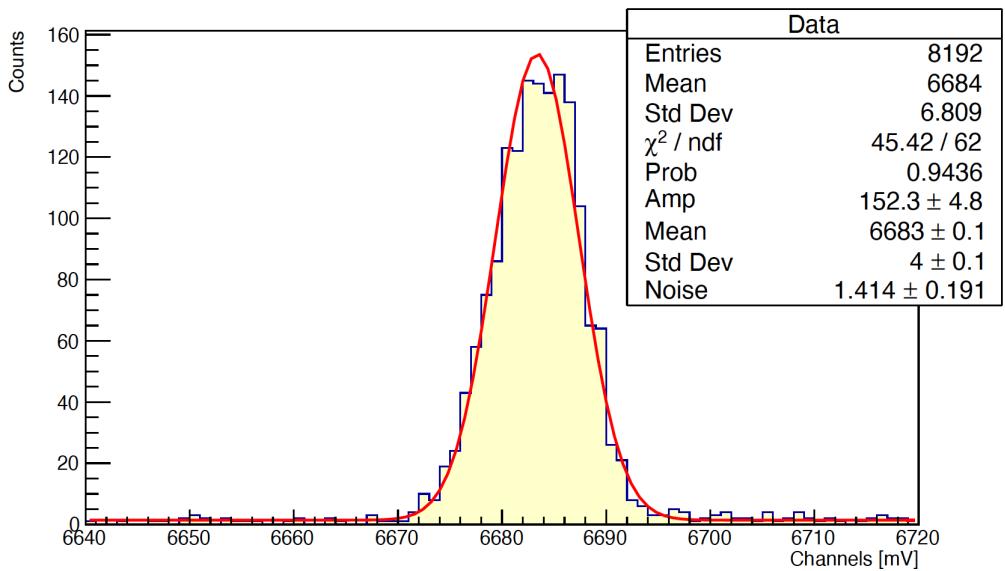


Figura 109: Picco a 2614 keV

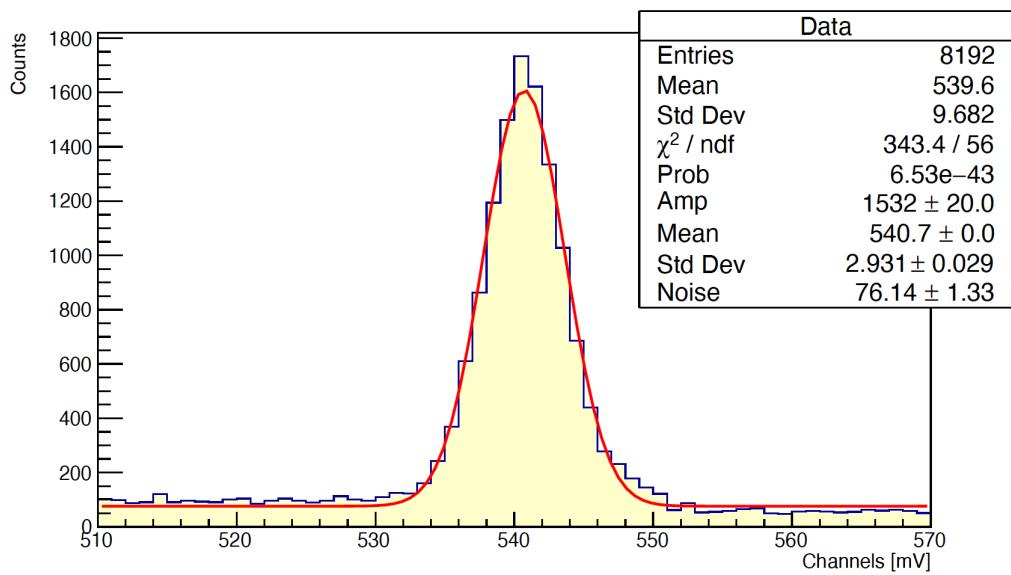


Figura 110: Picco a 238 keV

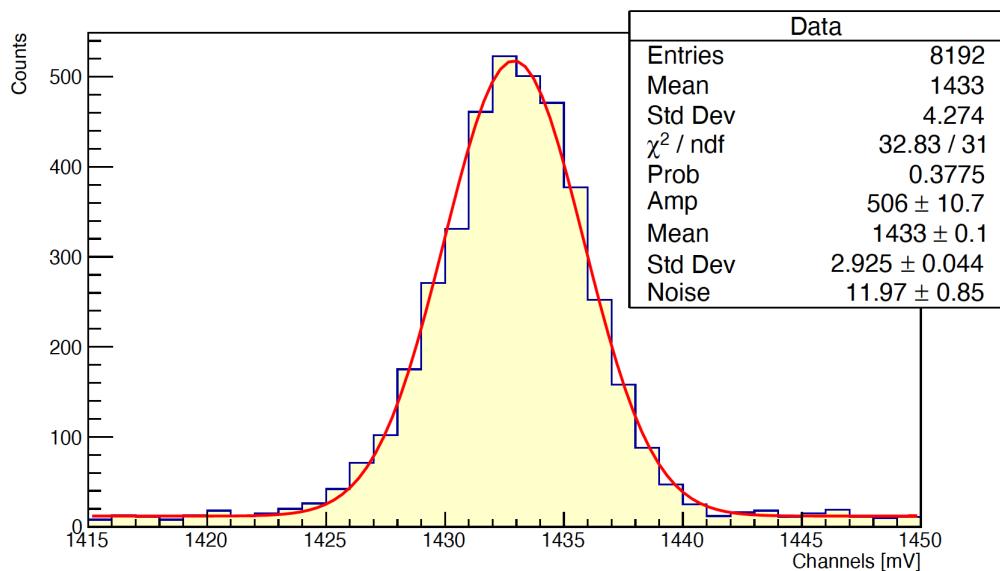


Figura 111: Picco a 583 keV

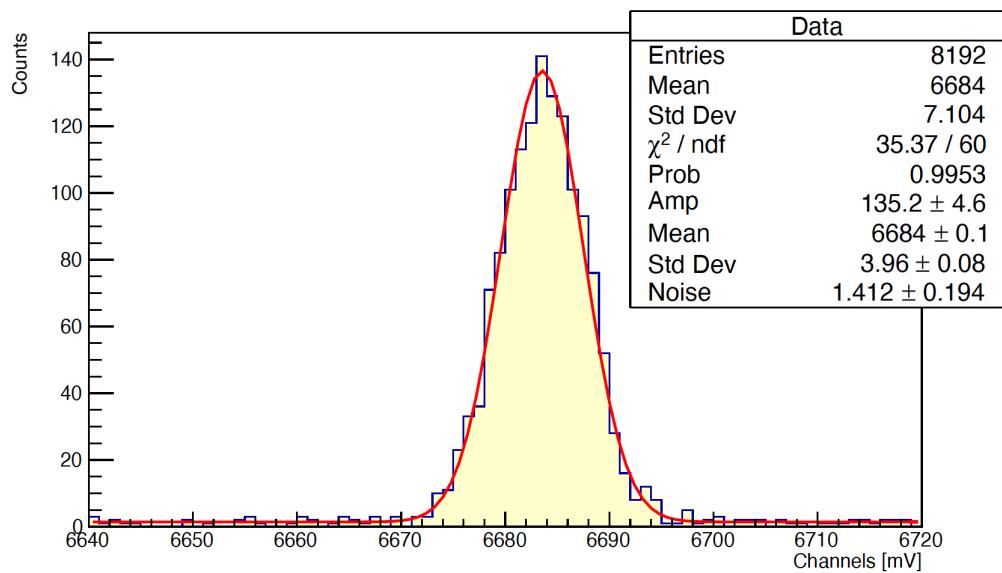


Figura 112: Picco a 2614 keV

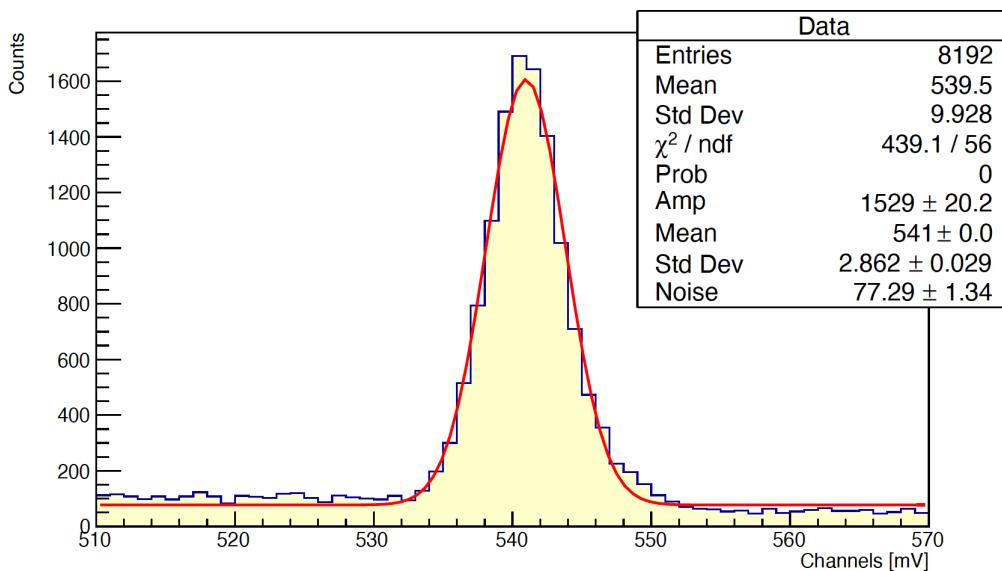


Figura 113: Picco a 238 keV

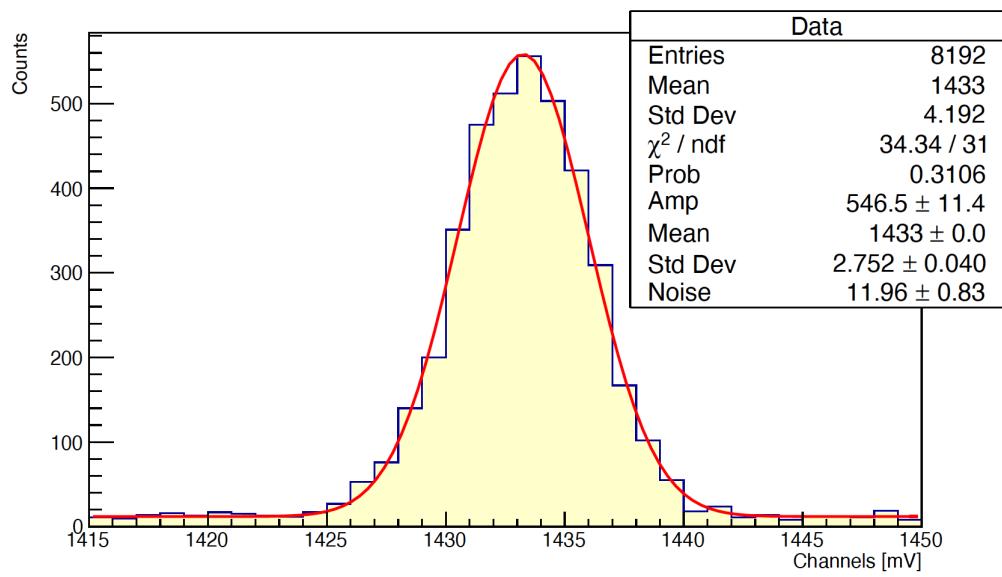


Figura 114: Picco a 583 keV

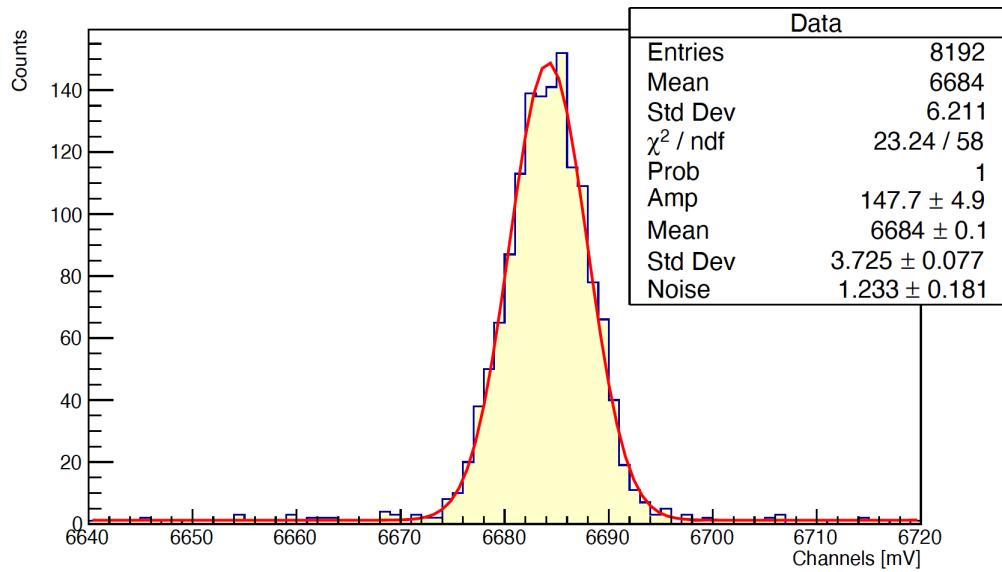


Figura 115: Picco a 2614 keV

4.9 Torio con piombo a 1, 21, 33, 58 e 108 cm di spessore

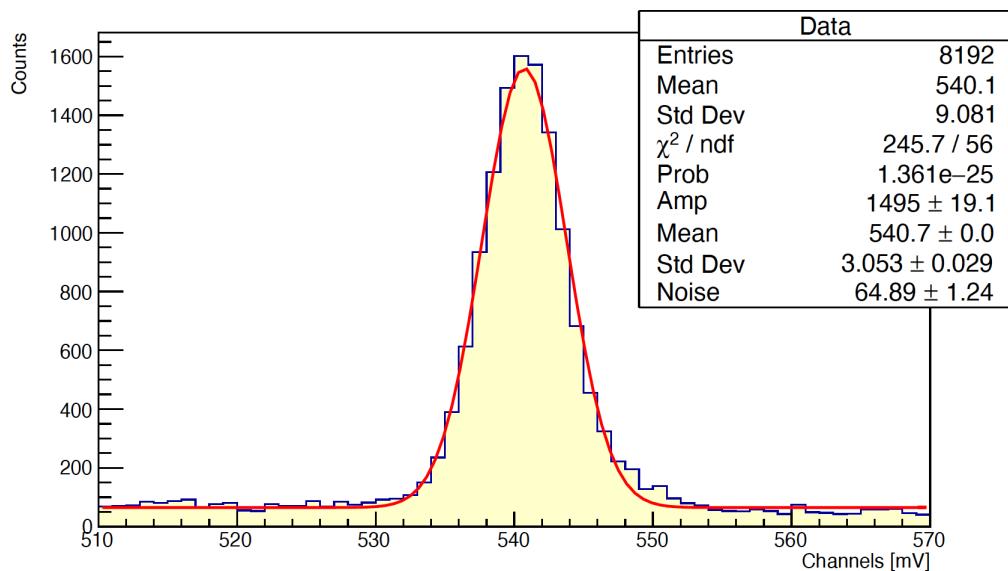


Figura 116: Picco a 238 keV

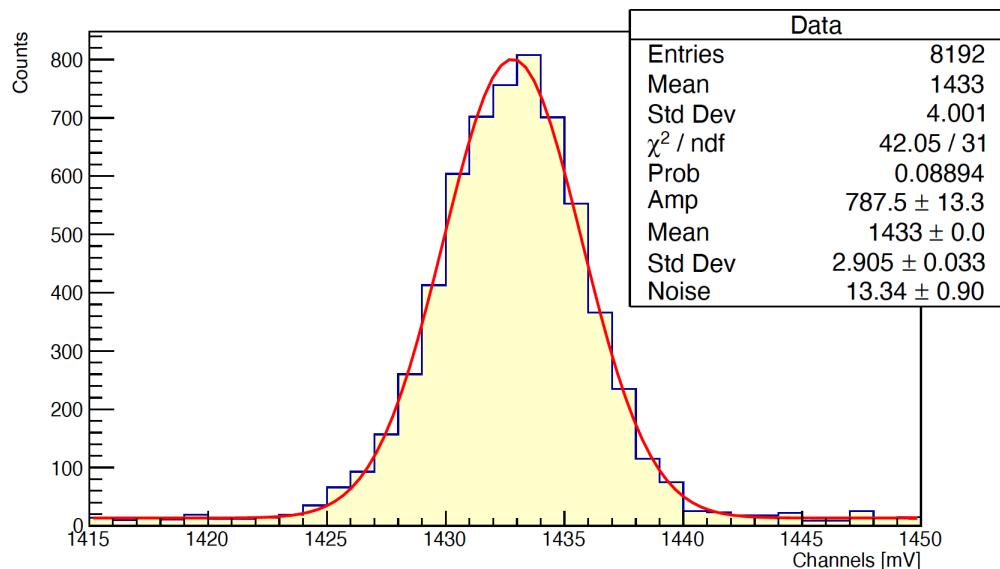


Figura 117: Picco a 583 keV

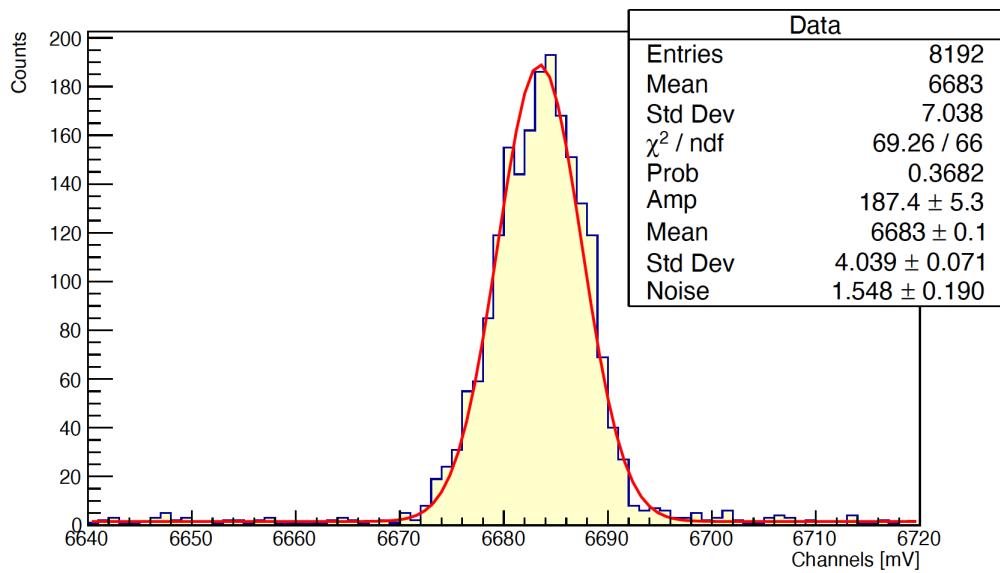


Figura 118: Picco a 2614 keV

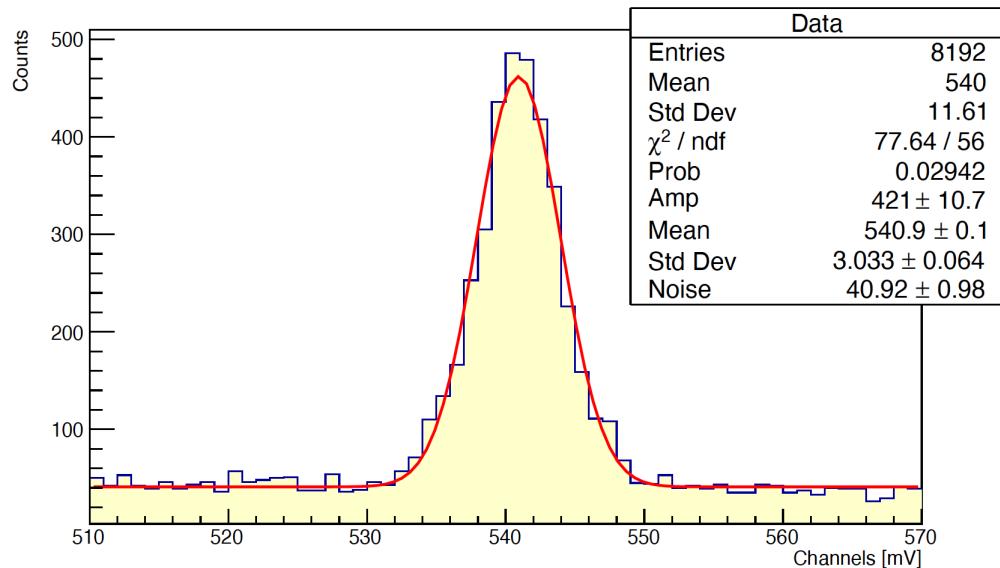


Figura 119: Picco a 238 keV

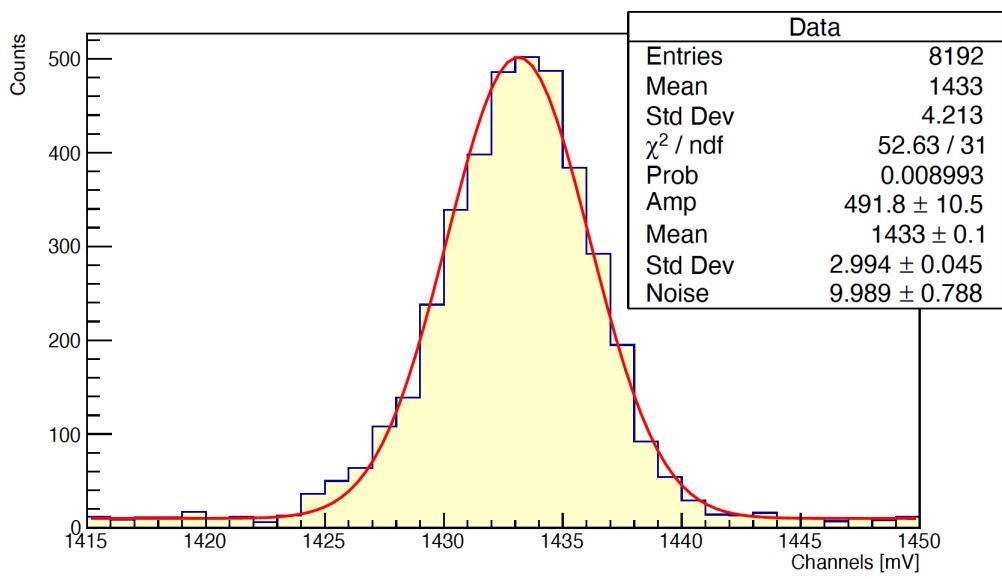


Figura 120: Picco a 583 keV

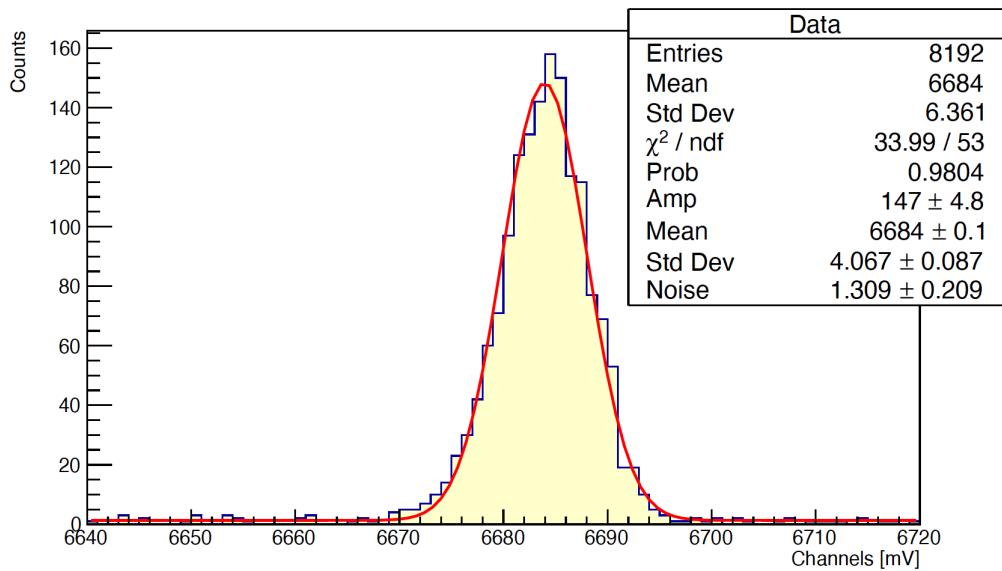


Figura 121: Picco a 2614 keV

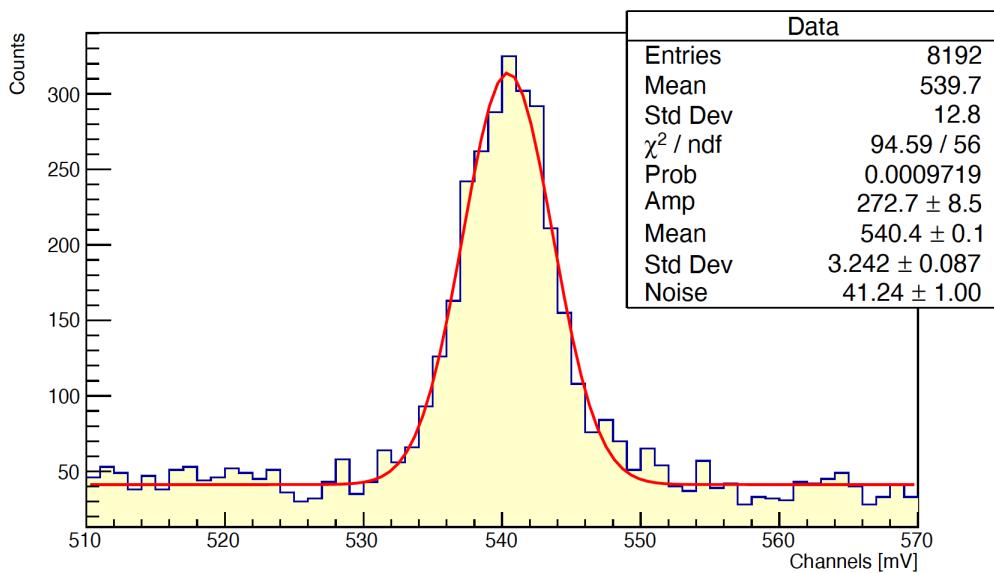


Figura 122: Picco a 238 keV

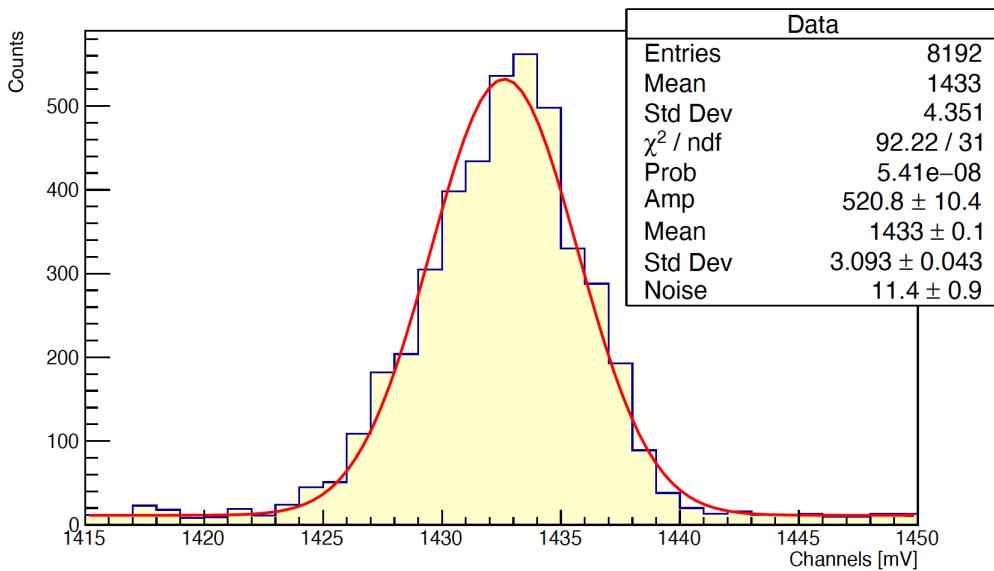


Figura 123: Picco a 583 keV

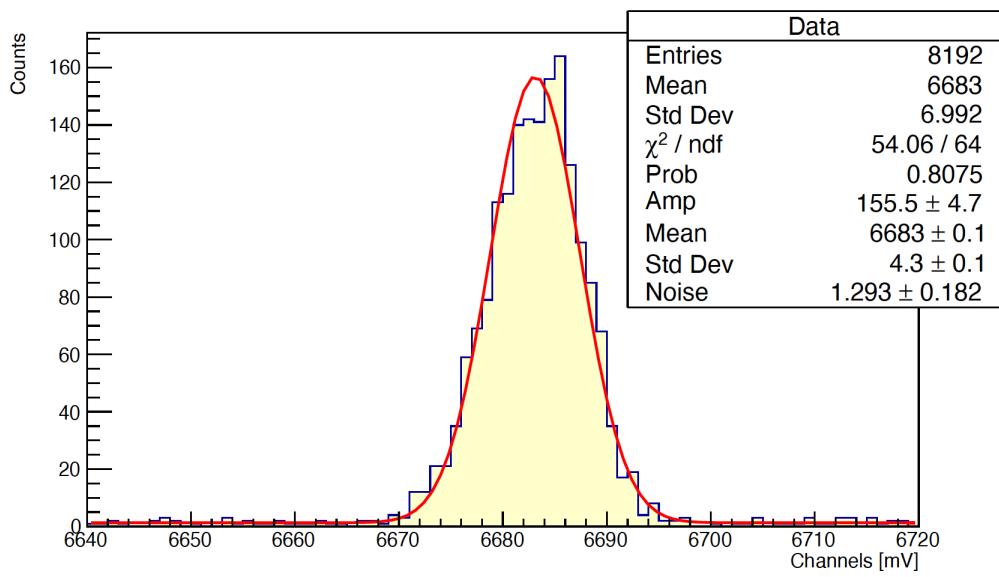


Figura 124: Picco a 2614 keV

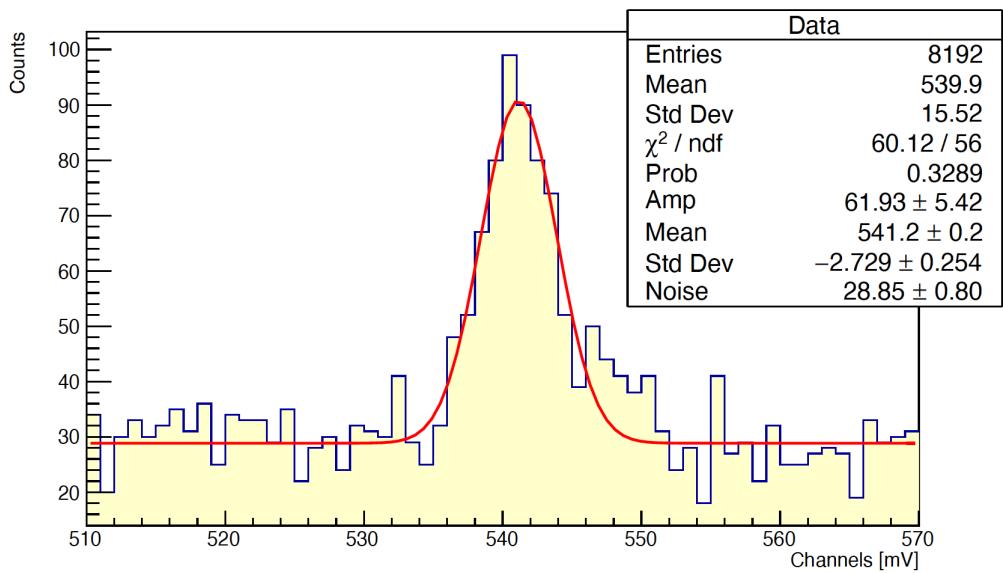


Figura 125: Picco a 238 keV

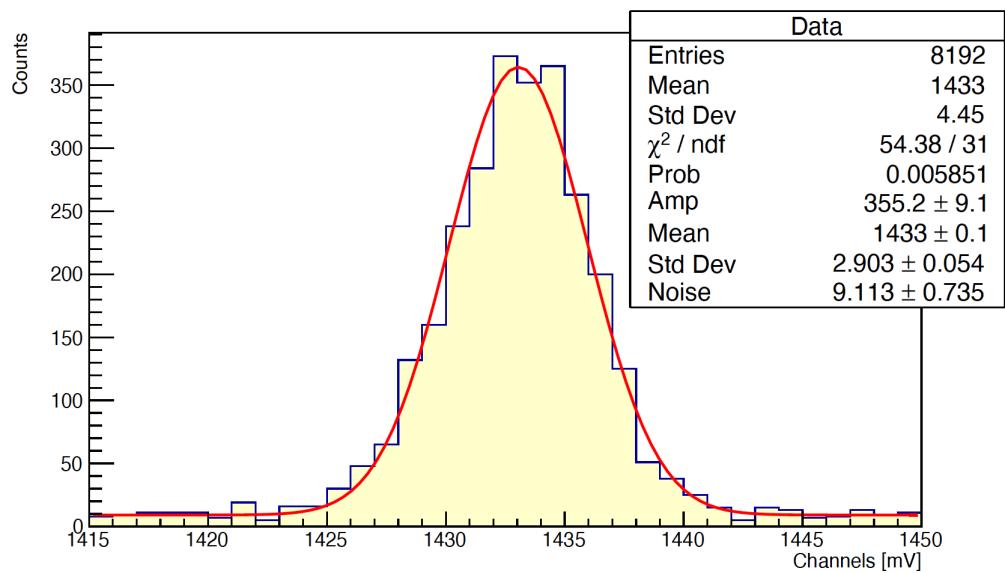


Figura 126: Picco a 583 keV

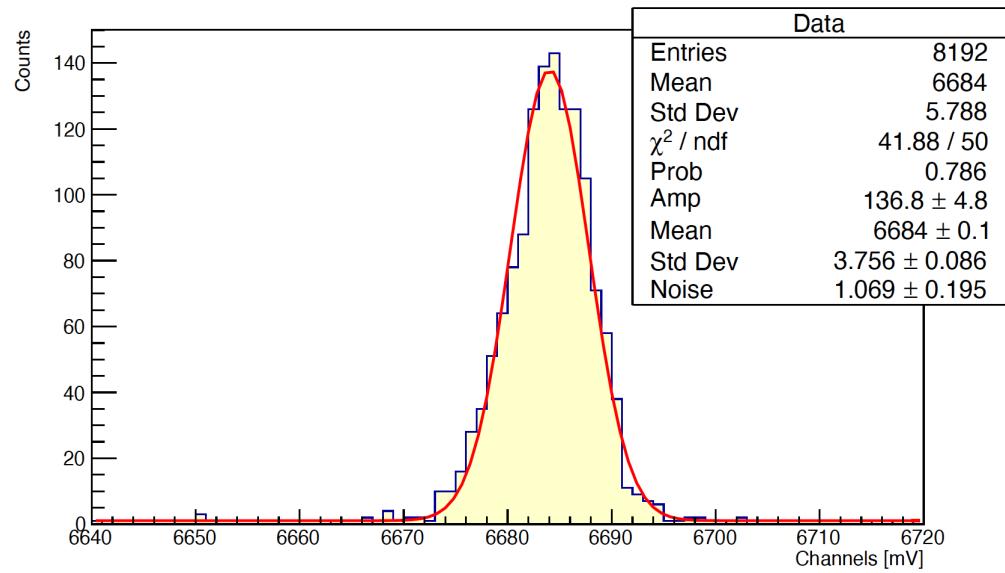


Figura 127: Picco a 2614 keV

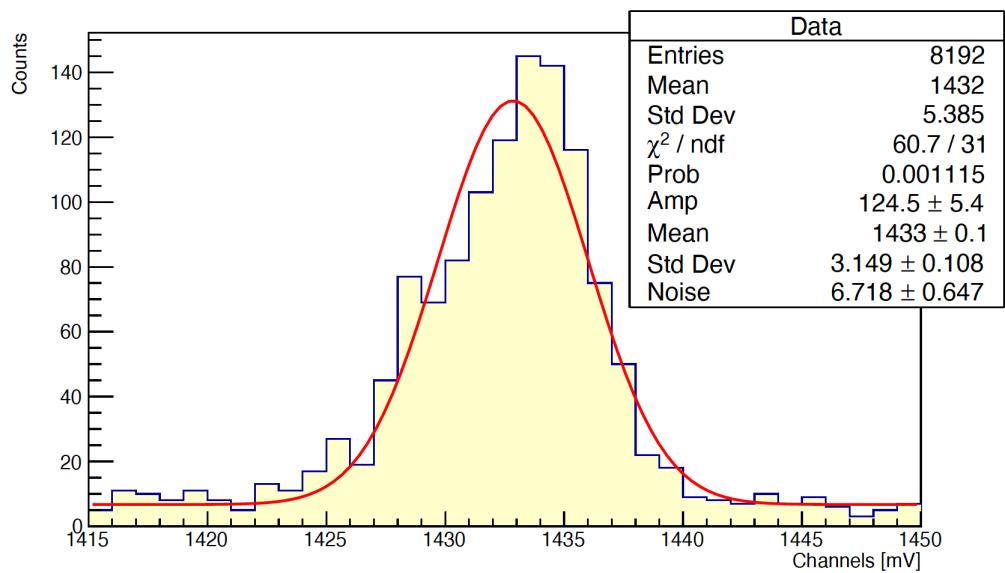


Figura 128: Picco a 583 keV

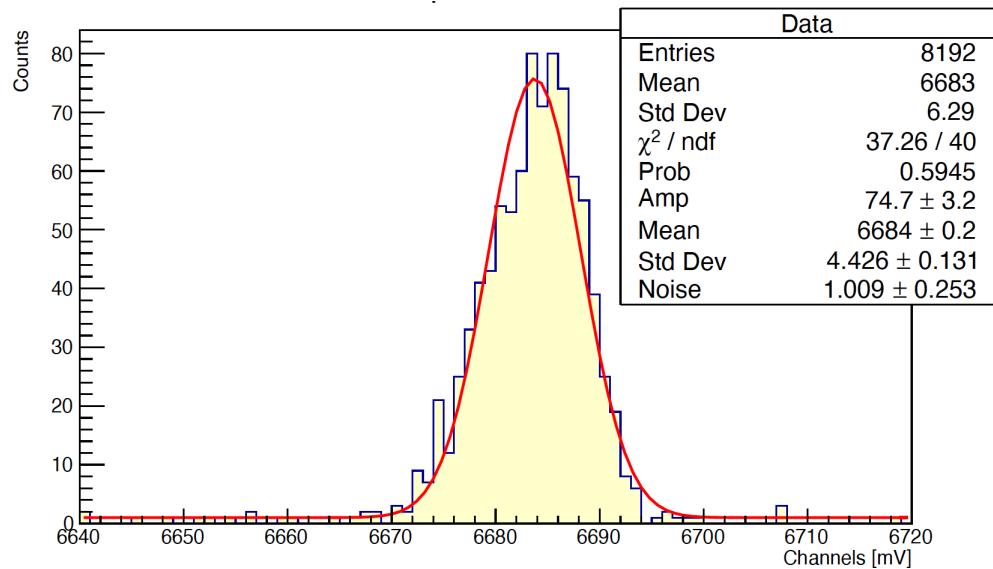
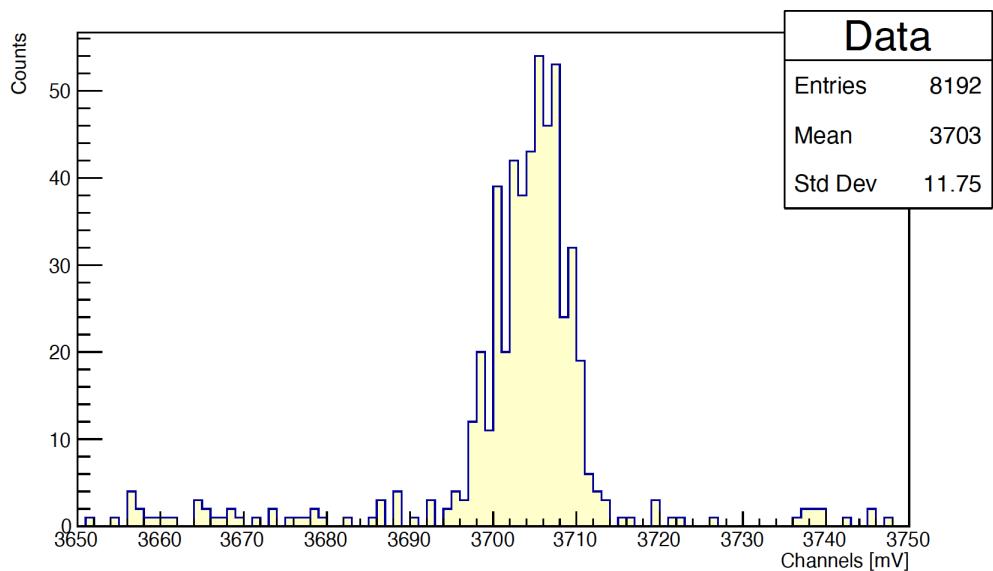
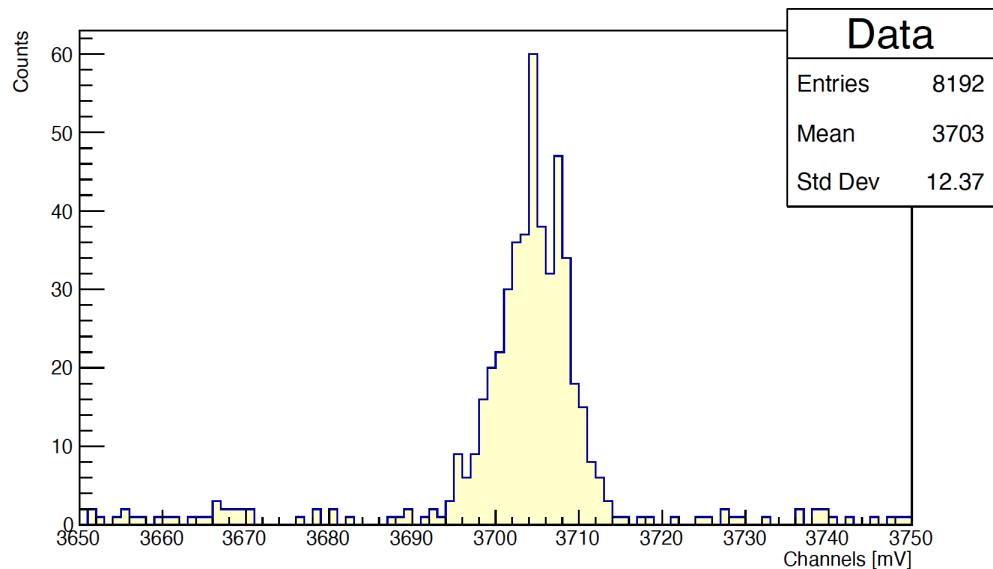
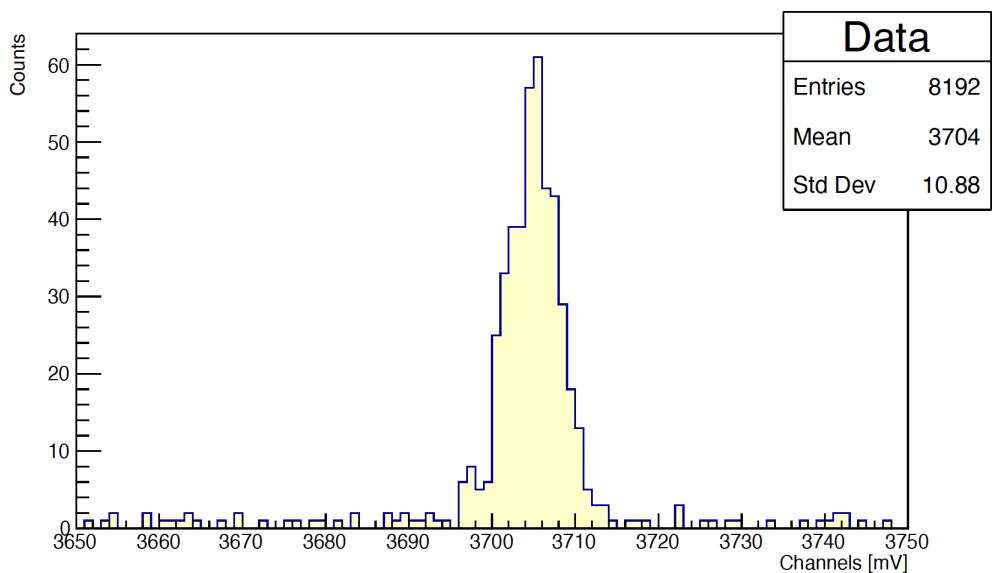
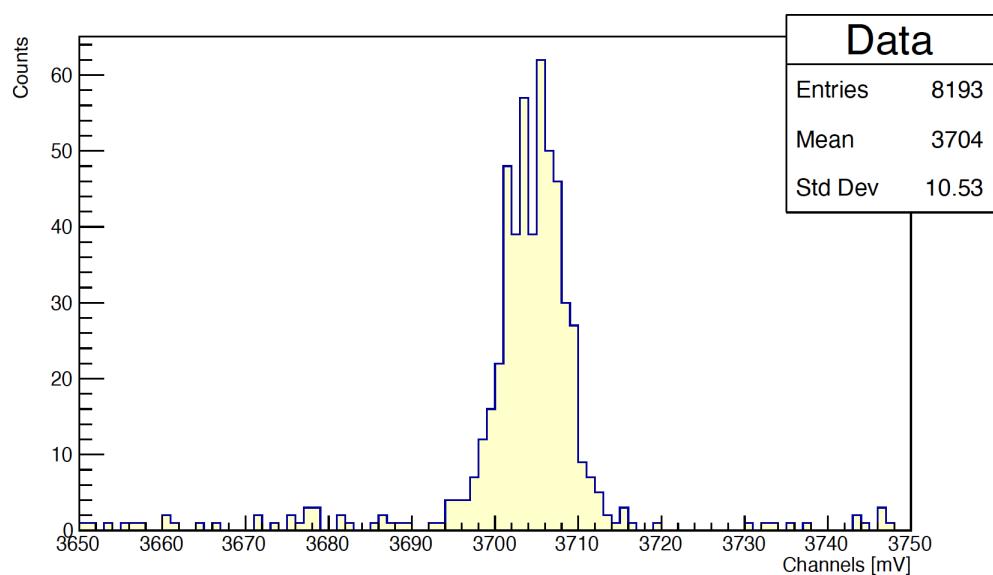
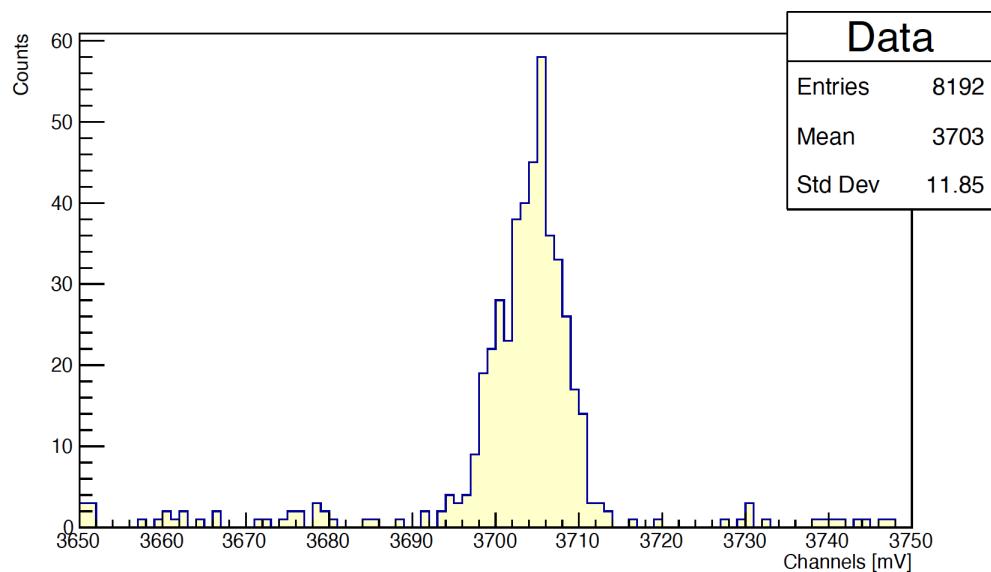


Figura 129: Picco a 2614 keV

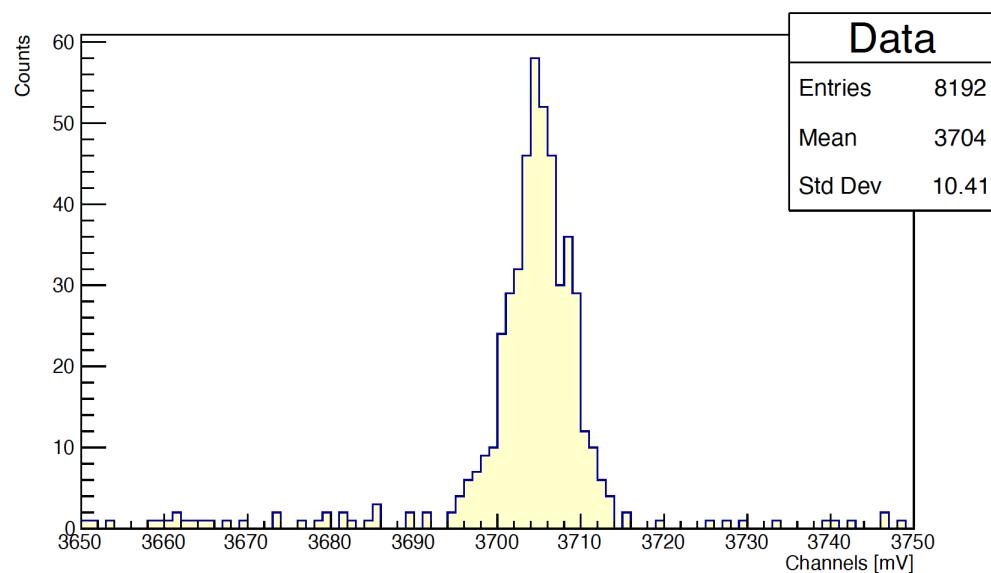
4.10 Picco a 1460 keV sodio con acqua a 4, 8, 12, 16, 20 cm di spessore

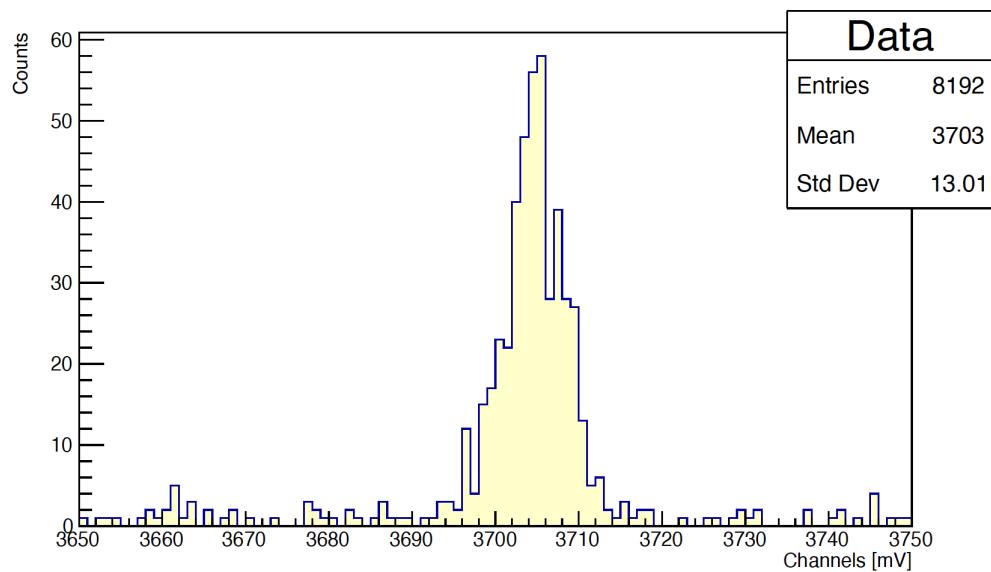
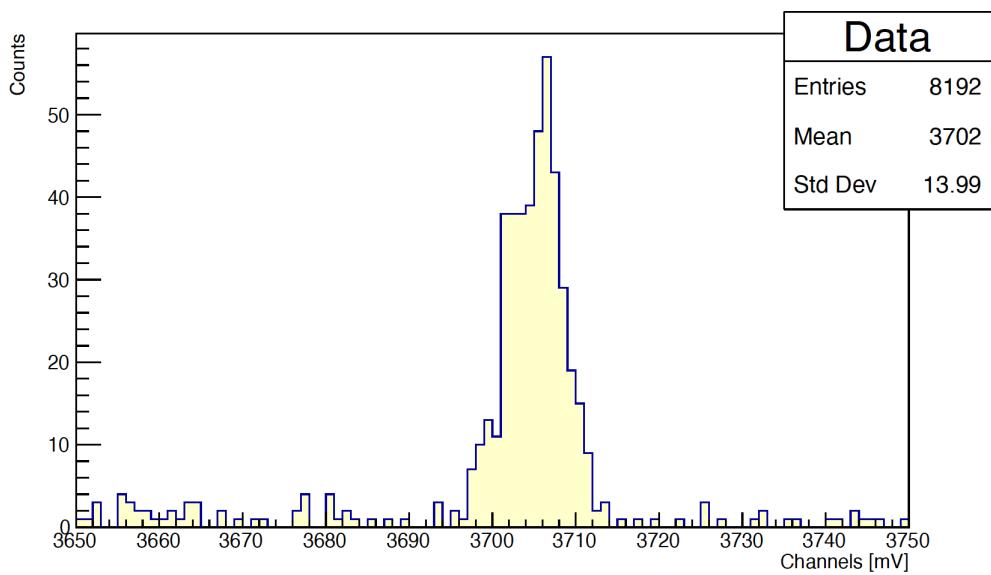


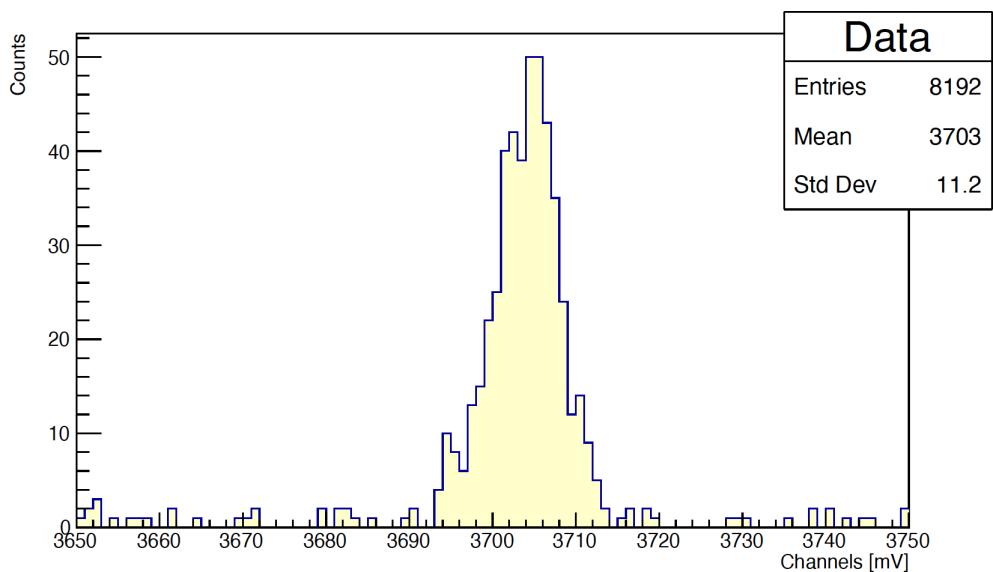
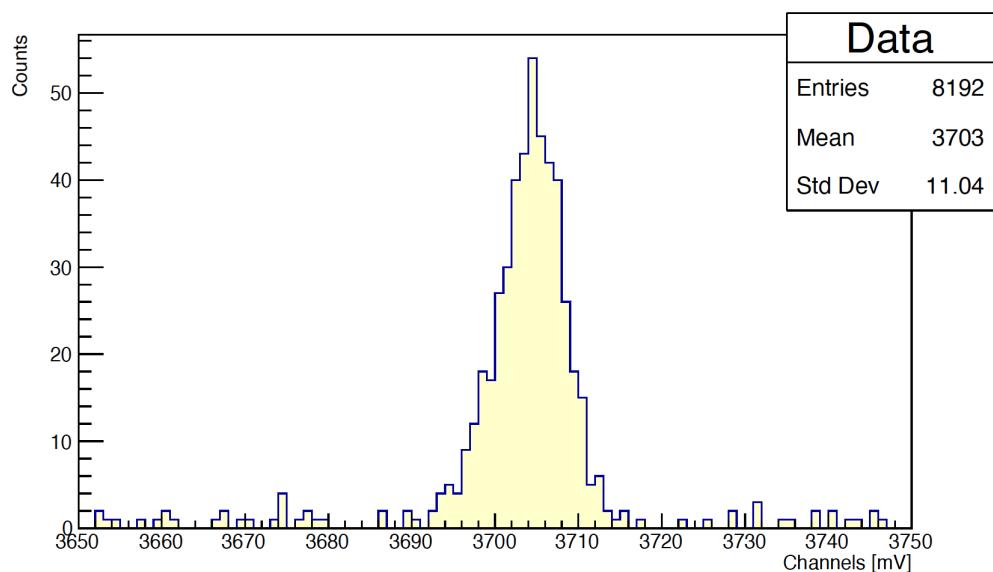




4.11 Picco a 1460 keV cobalto con acqua a 4, 8, 12, 16, 20 cm di spessore







4.12 Picco a 1460 keV torio con acqua a 4, 8, 12, 16, 20 cm di spessore

